



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PANU VEHNIÄINEN

PARAMETRISEN SUUNNITTELUMALLIN KEHITTÄMINEN SEKÄ
SEN KÄYTETTÄVYYDEN JA ELINKAAREN ARVIOINTI

Diplomityö

Tarkastajat: professori Asko Ellman,
yliopistonlehtori Antti Pulkkinen
Tarkastajat ja aihe hyväksytty Teknisten
tieteiden tiedekunnan tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 9. huhtikuuta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

VEHNIÄINEN, PANU: Parametrisen suunnittelumallin kehittäminen sekä sen käytettävyyden ja elinkaaren arviointi

Diplomityö, 68 sivua

Elokuu 2014

Pääaine: Tuotekehitys

Tarkastajat: professori Asko Ellman, yliopistonlehtori Antti Pulkkinen

Avainsanat: Parametrinen suunnittelumalli, SolidWorks, suunnitteluautomaatio

Projektikohtaisesti suunniteltavat tuotteet räätälöidään asiakkaan tarpeiden mukaisesti. Tästä syystä projektituotteiden yksityiskohtainen suunnittelu alkaa vasta kun tilaus on varmistunut, mikä pidentää projektien kestoja sekä kasvattaa kustannuksia. Projektikohtaisten tuoteyksilöiden suunnittelua voidaan nopeuttaa esimerkiksi suunnittelemalla tuoteperheitä ja muodostamalla tuoteyksilöt ennalta määritetyistä tuoteplatformeista aikaisempia ratkaisuita hyödyntäen. Tällöin tuotevarianttien suunnittelutyötä voidaan myös automatisoida erilaisia suunnitteluautomaatiojärjestelmiä hyödyntäen.

Tässä työssä tutkittiin mahdollisuutta soveltaa suunnittelun automatisointia kohdeyrityksen projektituotteissa. Tavoitteena oli ennen kaikkea projektikohtaisten mekaniikkasuunnittelutuntien sekä kustannusten karsiminen. Työssä selvitettiin asiakastarpeiden kautta tuotteen keskeisimmät ominaisuudet ja muuttujat sekä niiden määrittämiseksi tarvittavat parametrit. Tämän jälkeen kehitettiin parametrisesti ohjautuva malli, jonka avulla voidaan muokata kustutinpalkin 3D-mallit sekä osien valmistuspiirustukset projektikohtaisten parametrien mukaisiksi.

Tuloksena saadun mallin avulla on mahdollista saavuttaa huomattavia ajallisia säästöjä tuotteen projektikohtaisessa räätälöinnissä. Ajansäästöpotentiaalin hyödyntämiseksi tulee lähitulevaisuudessa kiinnittää huomiota erityisesti mallin toimintaan PDM-järjestelmän yhteydessä sekä riittävän selkeään ohjeistukseen ja dokumentaation laatimiseen mallin toiminnasta.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

VEHNIÄINEN, PANU: Parametric Design Model: Development and Evaluation of its Usability and Lifecycle

Master of Science Thesis, 68 pages

August 2014

Major: Product Development

Examiners: Professor Asko Ellman, Associate Professor Antti Pulkkinen

Keywords: Parametric modelling, SolidWorks, Design automation

In projecting business products are mostly tailor made according to customer specifications. Preliminary product design is usually required before order verification, which prolongs projects even further. Lead times of designing such products can be shortened by designing product families, where individual product variants can be derived from product platforms using existing solutions and working principles. Furthermore, more benefits can be gained by developing design automation systems to help design engineers with routine work.

The aim of this thesis was to study possibilities of design automation in project deliveries of case company. Main objective was to reduce amount of work (and thus costs) required to produce project specific manufacturing documentation. Finally a parametrically controlled model that can be used to generate project specific 3D-models and manufacturing documents was developed.

By using such parametrically controlled model, notable savings in design time of project-specific documents are possible. However, to fully realize the potential within the parametric model, further work has to be carried out to find best practices and develop documentation of how to use the parametric model in the current PDM-environment.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Metso Automation Oy:lle insinööritoimisto Elomatic Oy:n kautta. Haluan kiittää työn ohjauksesta ja tarkastamisesta professori Asko Ellmania sekä yliopistonlehtori Antti Pulkkista. Lisäksi haluan esittää kiitokseni Metso Automation Oy:n Niko Postille sekä Elomatic Oy:n Teemu Launikselle ja Arto Pelkoselle työni mahdollistamisesta sekä joustavuudesta aikataulujen suhteen.

Kiitokset myös Metso Automation Oy:n Vesa Kalliokoskelle monista hyvistä neuvoista rakenteen suunnittelutyöhön liittyen. Lisäksi haluan esittää lämpimät kiitokset kaikille läheisilleni ja ystävilleni kaikesta kannustuksesta ja tuesta sekä tämän työn että muidenkin opintojen aikana.

Tampereella 7. heinäkuuta 2014

Panu Vehniäinen

SISÄLLYS

Abstract	iii
Termit ja niiden määritelmät	vii
1. Johdanto	1
2. Projektitoiminta ja massaräätälöinti	2
2.1. Tilaus-toimitusprosessi ja tuotantostrategiat	2
2.2. Massaräätälöinti	5
2.3. Tuoteperheet, tuoteplatformat	7
2.3.1. Modulaariset tuoteperheet, modulaarisuus	8
2.3.2. Parametriset tuoteperheet	9
2.3.3. Tuoteperheiden arviointi ja optimointi	10
2.4. Suunnitteluautomaatiojärjestelmät ja niiden kehittäminen	11
2.4.1. Järjestelmien käytettävyys	14
2.4.2. Järjestelmien elinkaari	15
2.4.3. Yhteenveto, suunnittelujärjestelmät	16
3. Suunnittelumallin kehittäminen	18
3.1. Tuotteen toiminta ja esittely	18
3.1.1. Kostutinpalkin suunnittelu	20
3.1.2. Tavoitteiden määrittely	21
3.2. Parametrien määrittely	21
3.2.1. Rataleveys	21
3.2.2. Telan halkaisija – asennuspaikka	23
3.2.3. Liityntöjen paikat	24
3.2.4. Muut parametrit	25
3.2.5. Yhteenveto	25
3.3. Suunnitteluprosessin muutokset	26
3.4. Mallin toiminnan määrittely: ohjelmistot	29
3.5. Toteutusvaihtoehdot suunnittelumallille	30
3.5.1. DriveWorks	30
3.5.2. AutomateWorks	31
3.5.3. Makrot ja API-rajapinta	31
3.5.4. Design Table-ominaisuus	31
3.5.5. Yhteenveto toteutustavoista – toteutustavan valinta	32
3.6. Rakenteen suunnitteluratkaisuiden vaikutukset	33
4. Suunnittelumallin rakentaminen	36
4.1. Mallin rakenne	36
4.1.1. Parametrit ja niiden järjestys	37
4.1.2. Skeleton-mallin geometria	39
4.1.3. Design Table-taulukko	41
4.1.4. Osien työpiirustukset	43
4.2. Mallin käyttö ja käytettävyys	45

4.2.1.	Parametrien muuttaminen – käyttöliittymä	45
4.2.2.	Mallin käytön muutokset suunnitteluympäristössä	47
4.2.3.	Muutosten hallinta	48
4.3.	Parametrisen mallin elinkaari	51
4.3.1.	Tuoteperheen elinkaari	51
4.3.2.	Suunnittelujärjestelmän elinkaari	52
4.3.3.	Parametrisen mallin ylläpito	54
5.	Tulokset.....	55
6.	Tulosten tarkastelu	57
6.1.	Vertailu vanhoihin projekteihin.....	57
6.2.	Hyötyjen arviointi.....	59
6.3.	Kehityskohteita.....	60
6.3.1.	Mallit ja ohjelmistot	60
6.3.2.	Liikutuslaitteisto	61
6.3.3.	Suihkunsäätömekanismi	62
6.4.	Rajoitteet ja riskit	62
6.5.	Tulevat toimenpiteet.....	63
7.	Johtopäätökset ja päätelmät.....	65
	Lähteet.....	66

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

ATO	Assembly-to-order. Tuotantostrategia, jossa tuotteet kootaan tilauksen määrittelemistä – tyypillisesti varastoitavista – komponenteista, moduuleista tai osakokonaisuuksista.
CAD	Computer Aided Design. Tietokoneavusteinen suunnittelu.
ERP	Enterprise Resource Planning. Toiminnanohjausjärjestelmä.
ETO	Engineer-to-order. Tuotantostrategia, jossa tuotteiden suunnitellaan tilauksen mukaan.
MTO	Make-to-order. Tuotantostrategia, jossa tuotteet valmistetaan asiakastilauksen mukaisesti.
MTS	Make-to-stock. Tuotantostrategia, jossa tuotteita valmistetaan varastoon myöhempiä toimituksia varten.
OPP	Order Penetration Point. Asiakastilauksen kytkentäpiste kuvaa sitä, missä vaiheessa tilaus-toimitusprosessia asiakas-tilaus ohjaa tilausta.
PDM	Product Data Management. Tuotetiedonhallinta.
Sketch	2D-(tai 3D-) geometria, jolla määritellään CAD-mallinnuksessa piirteiden geometriaa.
Tuoteperhe	Joukko tuotteita, joille on yhteistä esimerkiksi saman toiminnallisuuden tai muun perustarpeen toteuttaminen.
Tuoteplatform	Joukko elementtejä, joiden avulla tuoteperheen yksilöt muodostetaan, sekä tieto siitä, kuinka tuoteyksilöt muodostetaan näistä elementeistä.

1. JOHDANTO

Teollisuuden investointihyödykkeet ovat usein asiakkaiden tarpeiden mukaisesti räätälöityjä, projektimaisesti suunniteltuja ja valmistettuja tuotteita. Näille projekteille ja tuotteille ovat monesti ominaista korkeat kustannukset sekä pitkäkestoiset projektit. Lisäksi tuotteita joudutaan tyypillisesti suunnittelemaan hieman jo tarjousvaiheessa ennen kauppojen varmistumista.

Toiminnan tehostamiseksi ja kustannusten säästämiseksi on joissakin yrityksissä alettu hyödyntää suunnittelun automatisointia projektikohtaisessa räätälöinnissä. Suunnittelun automatisoimista varten tuotteiden on oltava sellaisia, että yksittäiset tuotevariantit voidaan muodostaa etukäteen määriteltyjen suunnittelusääntöjen avulla.

Tässä työssä perehdytään suunnittelun automatisoimisen tarjoamiin mahdollisuuksiin ja haasteisiin kehittämällä parametrisesti ohjautuva suunnittelumalli Metso Automation Oy:n kostutinpalkista. Tämä työ on osa tuotekehitysprojektia, jossa kostutinpalkin rakenteen ja joidenkin teknisten ratkaisujen muutosten avulla tavoiteltiin säästöjä tuotteen valmistus- ja suunnittelukustannuksissa sekä pyrittiin saamaan tuotteesta paremmin soveltuva mekaniikkasuunnittelun automatisoimista varten.

Tämän raportin ensimmäinen osuus (luku 2) käsittelee tuoteperheisiin, massaräätelöintiin ja suunnittelun automatisointiin liittyvää teoriaa, tutkimusta ja menetelmiä, joita voidaan hyödyntää tämän työn puitteissa. Luvussa 3 esitellään kostutinpalkkia, sen suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä sekä haasteita ja ongelmakohtia, joihin tämän työn on tarkoitus puuttua. Luku 4 sisältää varsinaisen suunnittelumallin kehittämisen sekä sen toiminnan kuvaamisen suunnitteluympäristössä. Seuraavissa luvuissa esitellään työssä saadut keskeisimmät tulokset (luku 5), tulosten analysointi ja tarvittavat jatkotoimenpiteet (luku 6) sekä johtopäätökset tämän työn osalta (luku 7).

2. PROJEKTITOIMINTA JA MASSARÄÄTÄLÖINTI

Teollisuuden investointihyödykkeet ovat useimmiten projektiluontoisesti asiakkaiden tarpeiden mukaisesti suunniteltuja ja valmistettuja tuotteita. Monet projektit ovat luonteeltaan monimutkaisia ja pitkäkestoisia hankkeita, minkä lisäksi projektituotteet sisältävät kertaluontoisia, asiakaskohtaisia ratkaisuita. (Uusi-Rauva et al. 2005, s. 354–355, s. 437; Scallan 2003, s. 15–16)

Yhtenä vaihtoehtona projektimaiselle asiakasräätälöinnille on massaräätälöinti, jonka avulla pyritään vastaamaan yksilöllisesti asiakkaiden tarpeisiin, mutta samalla säilyttämään tuotannon tehokkuus korkealla tasolla sekä kustannukset projektitoimintaa alempana. Massaräätälöitäviin tuotteisiin voidaan siirtyä joko vakiotuotteista tai asiakkaiden tarpeiden mukaan räätälöidyistä tuotteista riippuen muun muassa siitä, mikä on yrityksen ja sen tuotteiden asema markkinoilla. Joskus massaräätälöinnistä käytetään myös nimitystä *systeeminen räätälöinti* (*Systemic Customization*) (Pulkinen 2007, s. 37–39). (Hvam et al. 2008, s. 24)

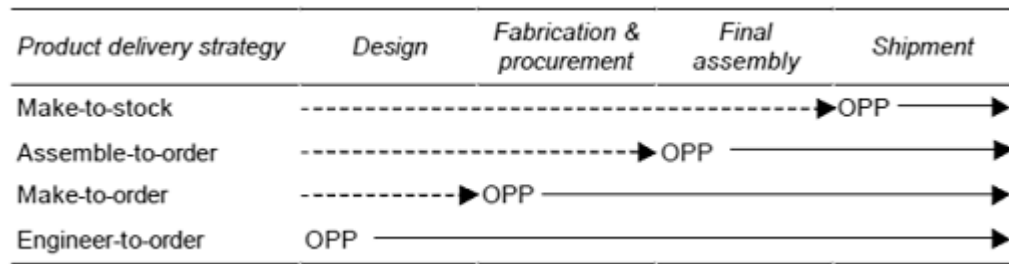
Tässä luvussa käsitellään massaräätälöintiin liittyviä vaihtoehtoja tarjota asiakastarpeiden mukaisia tuotteita joustavammin ja nopeammin. Luvussa perehdytään muun muassa tuoteperheisiin sekä tuotteiden suunnittelun automatisoimiseen, joita voidaan hyödyntää tämän työn soveltavassa osuudessa.

2.1. Tilaus-toimitusprosessi ja tuotantostrategiat

Tuotantostrategioita voidaan jaotella monella tavalla, muun muassa tuotteen muuntelumahdollisuuksien mukaan tilaus- ja vakiotuotteisiin tai tuotteiden valmistuserän koon mukaan yksittäis- tai sarjatuotteisiin. Usein asiakastarpeiden huomiointi tuotteiden muuntelussa sekä valmistuserän koko ovat toisistaan riippuvaisia, jolloin asiakkaiden tarpeiden mukaisesti suunnitellut tuotteet valmistetaan pienissä erissä tai yksittäiskappaleina. Vastaavasti vakiotuotteet, joiden tavoitteena on pyrkiä vastaamaan asiakkaiden tarpeisiin mahdollisimman nopeasti, valmistetaan usein suuremmissa erissä. (Uusi-Rauva et al. 2005, s.353–354)

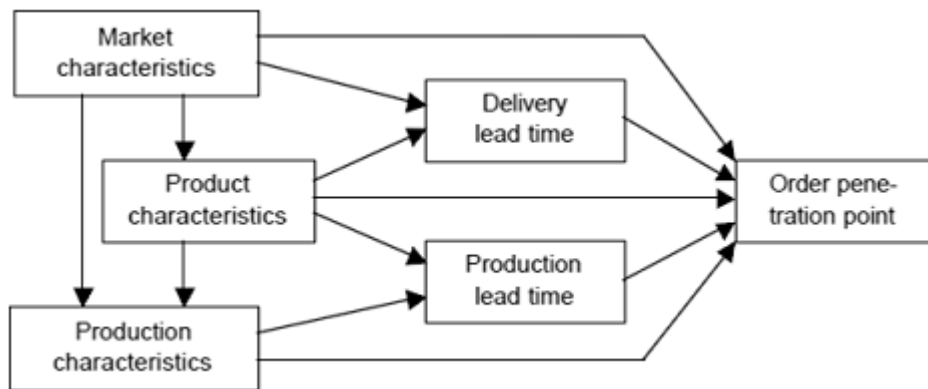
Tuotantostrategioita voidaan tarkastella myös sen mukaan, missä vaiheessa tilaus-toimitusprosessia sijaitsee asiakastilauksen kytkentäpiste (kirjallisuudessa usein *order penetration point*, OPP). Ennen asiakastilauksen kytkentäpistettä tuotanto perustuu kysynnän ennakointiin, ja vasta OPP:n jälkeen tilaus ohjaa tuotantoa. Tuotantostrategiat voidaan tällä määrittelyllä jakaa neljään osaan, jotka ovat *Engineer-to-order* (ETO), *Make-to-order* (MTO), *Assemble-to-order* (ATO) ja *Make-to-stock* (MTS). Asiakastila-

uksen kytkentäpisteen sijaintia toimitusketjussa eri strategioiden osalta on esitetty kuvassa 2.1.1. (Lehtonen 2004, s. 68–70; Olhager 2003, s. 320–321)



Kuva 2.1.1: Tuotantostrategiat (Olhager 2003, s. 320)

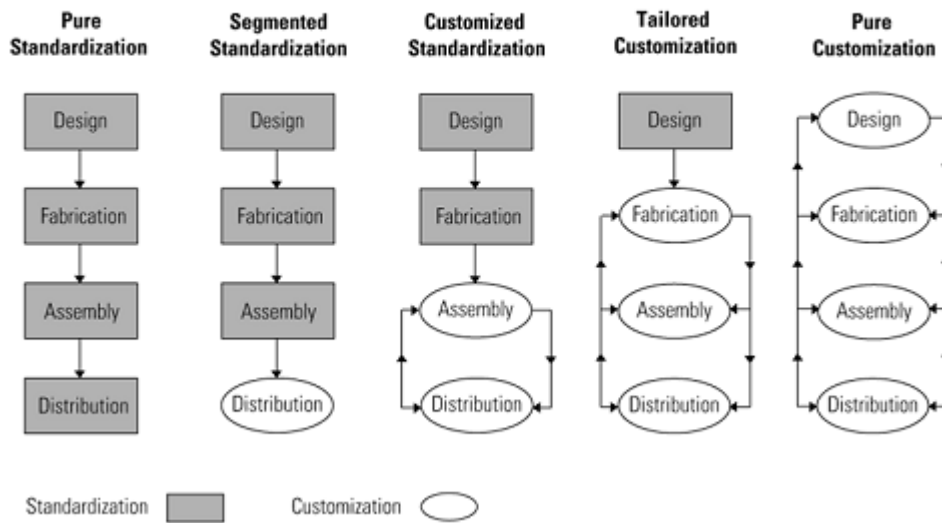
Tilauksen kytkentäpisteen sijainti riippuu useista markkinoista ja tuotteesta riippuvista tekijöistä, kuten Olhager (2003) (katso kuva 2.1.2) esittää. Tilauksen kytkentäpisteen sijainnista riippumatta tuotantoprosesseja voi yhden tuotteen valmistukseen liittyä useampia, joten esimerkiksi yksittäiskappaleena valmistettu asiakasräätälöity tilaus voi sisältää myös vakio-osia tai puolivalmisteita. (Uusi-Rauva et al. 2005, s. 355; Lehtonen 2004, s. 70)



Kuva 2.1.2: Asiakastilauksen kytkentäpisteeseen vaikuttavia tekijöitä (Olhager, 2003, s. 323)

Lampel ja Mintzberg (1996) erottelevat räätälöinnin ja vakioinnin eri muotoja hienan tarkemmin jakamalla tuotantostrategiat viiteen eri kategoriaan (katso kuva 2.1.3) sen mukaan, missä vaiheissa tuotantoprosessia asiakaslähtöistä tuoteräätälöintiä esiintyy. Nämä strategiat ovat vapaasti suomennettuina täysi vakiointi (*Pure Standardization*), osittainen vakiointi (*Segmented Standardization*), yksilöllinen vakiointi (*Customized Standardization*), räätälöity vakiointi (*Tailored Standardization*) ja täysi kustomointi (*Pure Customization*), (Lampel et al. 1996, s. 25–27)

Figure 1 A Continuum of Strategies



Kuva 2.1.3: Tuotantostrategiat (Lampel et al. 1996)

Lampel et al. (1996) mukaan asiakastarpeiden yksilöllinen toteuttaminen tulee aina sitä kalliimmaksi, mitä aikaisemmassa vaiheessa tilaus-toimitusprosessia se tapahtuu, sillä tämä lisää erilaisten tuotevariaatioiden määrää. Yrityksen kannalta kustannustehokasta asiakaskohtaista räätälöintiä voivat olla esimerkiksi yksilölliseen toimitukseen tai muut tuotteeseen liittyvät palvelut, jolloin asiakasräätälöinnillä ei vaikuteta valmistettavien tuotteiden määrään. (Lampel et al. 1996, s. 25)

Vakiointiin perustuvissa strategioissa (*Make-to-stock*, *Pure Standardization*) tuotteet ovat täysin vakioituja, ja ne yleensä tuotetaan suurissa sarjoissa. Näille tuotteille on yleensä ominaista pitkä elinkaari, sekä hyvin ennakoitava kysyntä. Vakiotuotteita valmistetaan tyypillisesti suurissa erissä varastoitaviksi, sillä useimmiten tämäntyyppisten tuotteiden on oltava asiakkaille saatavilla nopeasti. Monesti vakiointiin perustuvia strategioita voidaan menestyksekkäästi noudattaa myös silloin, kun kyseessä oleva tuote on ns. ”Dominant Design”-tuote eli omalla alallaan johtava tuote. *Segmented Standardization* (Lampel et al. 1996, s.25–26) tarkoittaa valmiiden vakiotuotteiden pientä muokkaamista asiakkaiden tarpeisiin. (Scallan 2003, s. 18; Lampel et al. 1996, s. 25–26; Uusi-Rauva et al. 2005, s. 353)

Assemble-to-order ja *Customized Standardization*-strategioissa vähintään osa tuotteesta koetaan rajoitetusta joukosta osia (tai osakokonaisuuksia, moduuleita, alikokoonpanoja), jotka asiakas voi tilauksen yhteydessä päättää. Kaikki yksittäiset osat ja osakokonaisuudet ovat kuitenkin vakioituja, joten niitä voidaan tarvittaessa valmistaa varastoon. Läpäisy aika on useimmiten näillä strategioilla lyhyt, riippuen tuotteiden muodostavien osakokonaisuuksien saatavuudesta kokoonpanoa varten. (Scallan 2003, s. 18; Lampel et al. 1996, s. 26)

Make-to-order tai *Tailored Customization*-strategioissa tuotteet valmistetaan tilauksen jälkeen, asiakastarpeet huomioiden. Näissä strategioissa asiakkaan panos ei kuitenkaan itse tuotesuunnittelussa ole kovinkaan suuri, mutta tuote voidaan määritellä asiak-

kaan tarpeiden mukaiseksi toimitettavien tuotteiden ja tuotevarianttien joukosta. Tuotteiden valmistus on yleensä kertaluontoista projekti- tai piensarjatuotantoa. Läpäisyajat riippuvat käytettävissä olevasta tuotannon kapasiteetista. (Scallan 2003, s. 18; Lampel et al. 1996, s.26)

Engineer-to-order (ETO) ja *Pure Customization*-strategioissa asiakaskohtainen räätälöinti on mukana myös tuotteiden suunnittelusta asti. Näillä strategioilla toimitetut tuotteet ovat sekä suunnittelun että valmistuksen osalta projektiluontoisesti toteutettavia hankkeita. Monesti tuotteet vaativat laajaa erikoisosaamista sekä valmistuksen että suunnittelun osalta. (Scallan 2003, s. 18–19; Lampel et al. 1996, s.26; Uusi-Rauva et al. 2005, s. 437)

ETO-tuotteiden läpäisy aikaan vaikuttaa suurelta osin suunnitteluun ja tuotemääritykseen tarvittava aika. Koska useat projektit ovat lisäksi kertaluontoisia ja saattavat vaatia erityisosaamista esimerkiksi tietynlaisten valmistusmenetelmien suhteen, saattaa yhteistyö uusien tuotteiden kehityksessä eri toimittajien kanssa olla erityisen aikaa kuluttavaa. (Amrani et al. s. 170–171)

Edellä esitetyt strategiat esiintyvät harvoin sellaisenaan kovinkaan monen yrityksen kohdalla, vaan usein käytettävä strategia voi vaihdella yrityksen sisällä toimitettavien tuotteiden välillä. Lisäksi esimerkiksi projektien kohdalla osa toimituksesta voi koostua lähinnä vakiotuotteista, ja asiakasräätälöinti keskittyy johonkin tiettyyn projektin osaan. Mikäli tuote koostuu komponenteista, joita valmistetaan eri strategioilla, kutsutaan *Make-to-stock*, *Assemble-to-order* ja *Make-to-order*-komponentteja joskus MAM-komponenteiksi. (Scallan 2003, s. 19; Lampel et al. 1996, s. 25–27)

2.2. Massaräätälöinti

Massaräätälöinnin (josta joskus käytetään myös nimitystä systeeminen räätälöinti) tavoitteena on tarjota asiakkaille yksilöllisiä tuotteita ilman, että tuotteiden kustannukset tai läpäisy aika nousevat. Massaräätälöintiin voidaan siirtyä joko projektituotteiden (*Engineer-to-order*, ETO) tai vakiotuotteiden (*Make-to-stock*, MTS) valmistuksesta, jolloin motiivit ja tavoitteet massaräätälöintiin siirryttäessä ovat erilaiset. Kun siirtyminen massaräätälöintiin tapahtuu vakiotuotteiden valmistuksesta, pyritään vastaamaan suurempaan asiakastarpeiden määrään ja saamaan lisää asiakkaita kasvattamalla tuotetarjontaa. Tällöin on olennaista tuoda asiakkaille ilmi kasvanut tuotetarjonta. (Hvam et al. 2008, s. 24–25; Haug et al. 2007, s. 11; Tseng et al. 1996, s.153)

Mikäli siirtyminen massaräätälöinnin suuntaan tapahtuu asiakasräätälöityjen tuotteiden valmistuksesta, tavoite on useimmiten nopeuttaa toimitusaikoja, alentaa kustannuksia sekä pyrkiä hallitsemaan tarjottavien tuotteiden määrää (Hvam et al. 2008, s. 24–25; Haug et al. 2007, s. 11). Toisin kuin siirryttäessä massaräätälöintiin massatuotannosta, on projektituotannosta siirryttäessä haasteellista se, kuinka tuotteen määrittävien ratkaisuvaihtoehtojen joukko määritellään siten, ettei tarpeettomasti supisteta tuotetarjontaa. Lisäksi on tärkeää saada tuotetarjonta pysymään sellaisella tasolla, että asiakkaat voivat

yhä pitää tuotteitaan heille räätälöityinä, vaikka asiakasräätälöinti tapahtuukin myöhemmässä vaiheessa tilaus-toimitusprosessissa. (Haug et al. 2007, s. 10–12)

Haug (2007) toteaa, että yrityksillä, jotka siirtyvät massaräätälöinnin suuntaan asiakasräätälöidyistä ETO-tuotteista, on yhtenä suurimmista tavoitteista joidenkin yritysten sisäisten prosessien, kuten tarjousmateriaalin tai valmistusdokumenttien tuottamisen, automatisointi. Tällaisissa tapauksissa haasteena tuotteiden ratkaisuvaihtoehtojen oikeanlaisen rajaamisen lisäksi on usein toimivan tietämys- tai suunnittelujärjestelmän rakentaminen, jonka avulla halutunkaltainen automatisointi voidaan toteuttaa. (Haug et al. 2007, s. 11–13)

Kuinka massaräätälöinnin suuntaan siirtyminen sitten voitaisiin ottaa huomioon tuotteiden suunnittelussa? Tseng ja Jiao (Tseng et al. 1996) esittävät DFMC-menetelmän (*Design for Mass Customization*), jonka tavoitteena on massaräätälöintiä mahdollistavan ja tukevan (modulaarisen) tuoteperheen kehittäminen. DFMC voidaan käsittää eräänlaisena rinnakkaissuunnittelun (CE, *Concurrent Engineering*) laajennettuna versiona, jossa itse tuotesuunnittelun (tai tässä tapauksessa tuoteperheen suunnittelun) ohella keskitytään suunnitteluratkaisuiden vaikutukseen useammilla osa-alueilla tuotteen elinkaaren aikana. Tämä tarkoittaa sitä, että tuoteperheen suunnittelulla pyritään edesauttamaan muun muassa suunnittelutiedon, valmistusmenetelmien, osa- ja materiaalityökalujen sekä valmistuksen logistiikkatietojen uudelleenkäyttöä tuoteperheiden yksilöiden välillä. Tuoteperheiden moduulien (tai rakenneosien, eng. *building blocks*) valinta pyritään optimoimaan siten, että saavutetaan riittävä määrä tuotevariaatioita asiakastarpeiden tyydyttämiseksi ja moduuleja voidaan käyttää muissa saman tuoteperheen tuotteissa, mutta variaatio tuotteissa tapahtuu niin korkealla tasolla, että tuotevariaatioiden määrä ei kasva hallitsemattomasti. (Tseng et al. 1996, s. 153–155)

Siinä missä Tseng ja Jiao (1996) keskittyvät puhumaan rakennusosista (moduuleista) koostuvista modulaarisista tuoteperheistä, Qiao et al. (2006) esittelee myös parametrisoidut tuotteet. Modulaarisista tuoteperheistä johdetut tuotteet voidaan määritellä ennalta määriteltujen (ja suunniteltujen) moduulien avulla. Parametrisoiduissa tuotteissa voidaan tuotteen ominaisuuksia muokata ja määritellä ennalta määritellyn parametrijoukon rajoissa. Asiakasräätälöintivaiheessa tuoteyksilö määritellään valitsemalla asiakkaan tarpeisiin sopivat parametrit. (Tseng et al. 1996, s. 155–156; Qiao et al. 2006, s. 375–376)

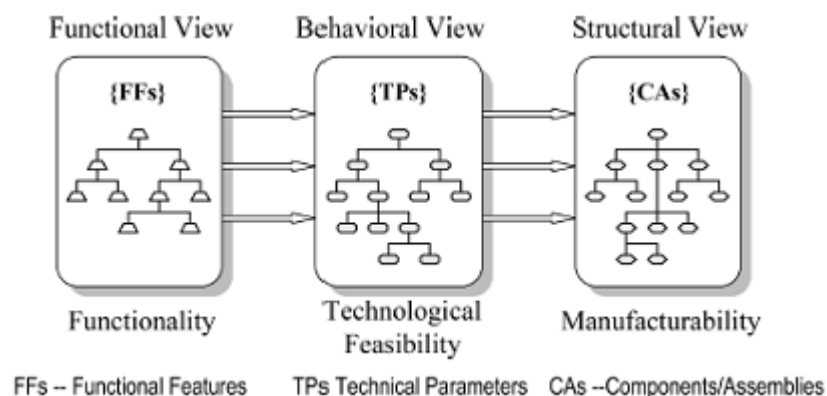
Eri tilaus-toimitusstrategioiden kautta vertailtuna parametrisoidut tuotteet ovat sellaisia, jotka valmistetaan asiakkaiden toiveiden mukaisilla parametreilla, joten niitä on käytännössä mahdotonta valmistaa varastoon, etenkin silloin, jos valittavien parametrien joukko on laaja. Toisaalta modulaaristen tuotteiden tapauksessa joitain moduuleita saatetaan voida valmistaa varastoon, jolloin tuotteet voidaan kasata asiakkaan toiveiden mukaisesti valmiista elementeistä. Osittain tästä syystä parametrisoitujen tuotteiden valmistuskustannukset ovat usein korkeammat kuin modulaarisilla tuotteilla, vaikka toisaalta myös asiakkaan vaikutusmahdollisuudet tuotteeseen saattavat olla laajempia. (Spahi 2008, s. 23)

Lyhyesti tiivistettynä siirtymällä toimintatavoissa massaräätälöinnin suuntaan on tavoitteena pyrkiä sellaiseen tuotteistoon ja tuotesuunnitteluun, jossa uusien tuotevariaatioiden luomisen yhteydessä ei tarvitse määrittää tuotteen valmistukseen, toimitukseen tai muihin elinkaaren aikaisiin toimintoihin liittyviä prosesseja uudelleen jokaisen tuotteen kohdalla. Pyrkimyksenä on saavuttaa sellainen tuotteisto, joka on asiakkaan näkökulmasta monipuolinen ja tarjoaa riittävästi variaatiomahdollisuuksia, mutta samanaikaisesti tuotteet ovat esim. valmistuksen ja logistiikan näkökulmasta mahdollisimman samanlaisia keskenään. Haasteena tulee olemaan – riippumatta siitä, millä tavalla asiakaskohtaiset tuotevariaatiot toteutetaan – kuinka rajataan tarjottavien tuotevariaatioiden joukko sopivaksi.

2.3. Tuoteperheet, tuoteplatformit

Kuten edellisestä luvusta käy ilmi, ovat tuoteperheet ja niiden suunnittelu keskeisessä asemassa, kun pyritään siirtymään asiakasräätälöidyistä tuotteista massaräätälöinnin suuntaan. Simpson et al. (2006) mukaan tuoteperhe voidaan määritellä toisiinsa liittyvinä tuotteina, jotka on johdettu tuoteplatformista. Tuoteplatformille on kirjallisuudessa useita määritelmiä. Tuoteplatformi voidaan käsittää esimerkiksi joukkona yhteisiä elementtejä, joista tietyn tuotesarjan tuotteet muodostetaan. Esimerkiksi modulaarisessa tuoteperheessä tuoteplatformiksi kutsutaan sitä joukkoa moduuleita, joiden avulla tuoteperheen uudet tuoteyksilöt voidaan muodostaa (Simpson et al. 2006, s. 3). Platformin tuotteille on usein yhteistä myös niiden sisältämät tekniset ratkaisut, jolloin uusien tuotteiden ja moduulien suunnittelu platformin avulla nopeutuu (Jiao et al. 2000, s. 471).

Jiao ja Tseng (2000) puhuvat tuoteperhearkkitehtuurista (Product Family Architecture, PFA), josta tuoteperheen tuoteyksilöt johdetaan. Tämän mallin mukaan tuoteperheen rakennetta voidaan tarkastella kolmesta eri näkökulmasta, jotka ovat toiminnallinen, teknillinen ja rakenteellinen näkökulma (katso kuva 2.3.1). (Jiao et al. 2000, s. 473–474)



Kuva 2.3.1: Tuoteperheen rakenne eri näkökulmista (Jiao et al. 2000, s. 473)

Toiminnallinen näkökulma kuvaa ennen kaikkea sitä, millaisia toiminnallisuuksia ja ominaisuuksia tuoteperheen tuotteilla voidaan kattaa. Siten tästä näkökulmasta voidaan arvioida sitä, kuinka hyvin tuoteperheellä voidaan täyttää eri asiakasryhmien vaatimuk-

set. Asiakasvaatimusten kautta johdetut toiminnalliset vaatimukset yhdistetään niitä vastaaviin teknisiin ratkaisumenetelmiin teknillisessä näkökulmassa. Rakenteellinen näkökulma esittää sitä, kuinka asiakasvaatimuksista johdetut toiminnalliset vaatimukset ja teknilliset ratkaisut esiintyvät komponentteina varsinaisessa tuotteessa. (Jiao et al. 2000, s. 473–474)

Tuoteperheiden ja -platformien kehitystä voidaan luokitella myös riippuen kehityksen lähtökohdista. Ensimmäisessä, *top-down*-lähestymistavassa (proaktiivinen lähestymistapa), kehitetään alusta alkaen tuoteplatformiin perustuva tuoteperhe. Toinen vaihtoehto on *bottom-up*-lähestymistapa (reaktiivinen lähestymistapa), jossa olemassa olevien tuotteiden pohjalta kehitetään tuoteperhe, jonka tarkoituksena on tarjota asiakkaiden näkökulmasta sama määrä variaatioita, mutta pienemmällä määrällä tuotteita. (Simpson et al. 2006, s. 5–6)

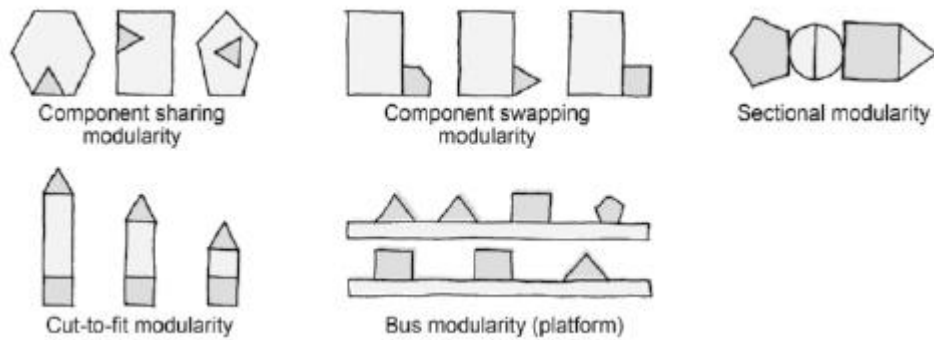
Tuoteperheitä voidaan myös jaotella sen mukaan, kuinka tuoteyksilöiden väliset muutokset toteutetaan. Platformeihin perustuvat tuoteperheet ovat lähes poikkeuksetta *modulaarisia* eli *konfiguroituvia* tuoteperheitä, joiden lisäksi on olemassa myös *skaalautuvia* eli *parametrisiä* tuoteperheitä. Nämä tuoteperheiden tyypit käsitellään seuraavissa alaluvuissa. (Simpson et al. 2006, s. 6)

Pahl & Beitz (1996) esittävät, että suunnittelua ja valmistusta voidaan rationalisoida hyödyntämällä kokoluokkia (eng. *size ranges*) tai moduuleita. Vaikka Pahl & Beitz (1996) eivät suoranaisesti puhu tuoteperheistä, voidaan kokoluokkien ja moduulien hyödyntämisen sekä tuoteperheiden välillä nähdä selviä yhtäläisyyksiä. Kokoluokkia ja moduuleita hyödyntävien tuotesarjojen etuina ovat muun muassa toistuvien suunnittelutehtävien väheneminen, kustannustehokkuuden parantuminen, sekä toimitusaikojen lyheneminen. Mahdollisena haittapuolena tällaisella muuntelulla voi olla liian rajoittunut tuotetarjonta. (Pahl et al. 1996, s. 465)

2.3.1. Modulaariset tuoteperheet, modulaarisuus

Modulaarinen tuote voidaan määritellä tuotteeksi, joka koostuu joukosta itsenäisiä elementtejä, jotka liittyvät toisiinsa tiettyjen rajapintojen kautta. Modulaarisuudelle voidaan määritellä erilaisia tyyppejä sen mukaan, kuinka moduulit sijoittuvat keskenään tuotteessa, mitä tavoitteita moduulien käytöllä on sekä millainen on moduulien keskinäinen vaihtokelpoisuus. (Hvam et al. 2008, s. 30–31)

Joitakin modulaarisuuden yleisimpiä tyyppejä on esitetty seuraavassa kuvassa (Hvam et al. 2008, s. 31).



Kuva 2.3.2: Modulaarisuuden tyyppejä (Hvam et al. 2008, s.31)

Modulaarisuuden esitettyjä tyyppejä ovat kuvassa 2.3.2 vasemmalta ylänurkasta lukien saman elementin käyttö eri kombinaatioissa, elementin vaihtokelpoisuus, vakiorajapintojen mahdollistama kokoonpano, pituuden tai muun parametrin muuntelu elementissä sekä väylätyyppinen rakenne. (Hvam et al. 2008, s. 30–31)

Modulaarisissa tuoteperheissä vaihtelu tuoteyksilöiden välillä tapahtuu tuotteen muodostavia moduuleita vaihtamalla, lisäämällä tai vähentämällä. Modulaaristen tuoteperheiden tehokkuuden kannalta olennaisena asiana esille nousee moduulien välisten rajapintojen määrittely. Haasteena on erityisesti suunnitella rajapinnat sellaisiksi, että ne mahdollistavat myös uusien tuotteiden kehityksen samaan moduulijärjestelmään. (Simpson et al. 2006, s. 6; 520)

Kuvassa 2.3.2 esiintyvät modulaarisuuden tyypit esiintyvät harvoin tuotteissa ja tuoteperheissä yksittäin, vaan tuoteyksilöiden välillä voi eri moduulien kesken esiintyä useantyyppistä muuntelua. Uusia tuotteita voidaan aikaansaada esimerkiksi skaalaamalla tuotteen rakenteesta riippuen joko joitakin tai kaikkia tuotteen moduuleita suuremmiksi tai pienemmiksi, jonka lisäksi joitain moduuleita on samassa yhteydessä korvattava toisilla moduuleilla. (Simpson et al. 2006, s. 200–201)

Pahlin & Beitzin (1996) mukaan modulaarisuutta voidaan hyödyntää tuotteiden muuntelussa silloin, kun tuotesarjan eri malleilla on voitava toteuttaa erilaisia toimintoja. Modulaarisiksi tuotteiksi Pahl & Beitz määrittelevät sellaiset tuotteet, jotka toteuttavat toimintoja erilaisten moduuleiksi kutsutuiden toimintayksiköiden avulla. Moduulityyppejä määritellään tässä yhteydessä viisi erilaista sen mukaan, millaisia toimintoja ne toteuttavat. (Pahl et al. 1996, s. 495–510)

2.3.2. Parametriset tuoteperheet

Parametriset tuoteperheet koostuvat tuotteista, jotka poikkeavat toisistaan esimerkiksi geometrian mittojen tai jonkin tuotteen osan ominaisuuden (esimerkiksi moottorin teho, tuotteen fyysiset mitat) osalta. Muuttuvat parametrit voidaan jaotella esimerkiksi yhteisiin ja ainutkertaisiin muuttujiin sen mukaan, koskevatko kyseiset muuttujat vain tuoteperheen yhtä tuotetta vai vaikuttavatko ne kaikkiin tuoteperheen tuotteisiin. (Simpson et al. 2006, s. 8–9; 139)

Pahlin & Beitzin (1996) määrittelemiä kokoluokkia voidaan hyödyntää sellaisiin tuotteisiin, joita tarvitaan erikokoisina ja jotka lisäksi suorittavat samoja toimintoja, perustuvat samoihin toimintaperiaatteisiin sekä ovat samalla tavalla valmistettavissa. Kokoluokkia voidaan kehittää uusiin tai olemassa oleviin tuotteisiin. Ideana on, että yksi kokoluokka valitaan ns. perusmalliksi, josta kokosarjan muut mallit johdetaan tuotteesta ja sen toiminnasta riippuen erilaisia samankaltaisuussääntöjä ja sarjojen porrastusperiaatteita hyödyntäen. Kokoluokkien määrittäminen voi käsittää esimerkiksi rakenteen mittojen välisten suhteiden tai kriittisten rakenteen osien jännitysten säilymistä samanlaisena koko sarjan läpi. Tuotesarjan kokojen väliset porrastukset voivat myös vaihdella huomattavasti tuotteesta ja sen oleellisista ominaisuuksista riippuen. (Pahl et al. 1996, s. 466–495)

Joskus tuoteperheissä voi esiintyä sekä modulaarista muuntelua että tuotteiden osien parametrin skaalautuvuutta. Esimerkiksi matkustajalentokoneissa esiintyy usein skaalautuvuutta tuoteyksilöiden välillä matkustajamäärän mukaan, jolloin matkustajamäärän kasvaessa lentokoneen rungon pituus kasvaa ja vastaavasti nostovoiman tarpeen noustessa myös siipien kärkiväli kasvaa. (Simpson et al. 2006, s. 202–203)

2.3.3. Tuoteperheiden arviointi ja optimointi

Edellisissä luvuissa on esitetty erilaisia määritelmiä tuoteperheille sekä menetelmiä niiden hyödyntämiseksi ja kehittämiseksi. Riippumatta siitä, mistä näkökulmasta tuoteperheen kehitystä tarkastellaan, tulee esille kysymys siitä, kuinka tuoteperhe tulisi määritellä, jotta saavutettaisiin tuoteperheiden hyödyt tuotevariaatioiden hallinnassa, mutta yksittäisen tuotevariaation suorituskkyky ei kuitenkaan olisi liian heikko verrattuna ETO-suunniteltuun tuotteeseen.

Tuoteperheiden optimaalisten suunnittelumuuttujien ja niiden arvojen selvittämiseen on esitetty erilaisia menetelmiä kirjallisuudessa. Tuoteperheiden ja tuoteplatformien optimointia voidaan jaotella sen mukaan, ovatko tuoteperhettä määrittävät muuttujat tiedossa etukäteen, jolloin optimoinnilla pyritään hakemaan muuttujille optimaalisia arvoja, vai tuleeko optimoinnin kattaa myös muuttujien valinta. (Simpson et al. 2006, s. 134)

Yhtenä esimerkkinä tuoteperheiden muuttujien valinnan optimoimisesta on tuoteperheiden sakkofunktiomenetelmä (*Product Family Penalty Function*), jolla pyritään valitsemaan parametrin tuoteperheen parametrit siten, että saavutetaan paras mahdollinen kompromissi suorituskyyvyn ja tuotevariaatioiden määrän välillä (Messac et al. 2002, s. 164–166). Suuressa osassa optimointi- ja arviointimenetelmiä oletetaan, että maksimoimalla yksittäisen tuotteen suorituskkykyä maksimoidaan myös sen kysyntää. Vastaavasti tuoteyksilöiden välisen yhtäläisyyden kasvattamisen oletetaan laskevan kustannuksia, jolloin yksinkertaistettuna optimaalinen tuoteperhe pyritään saavuttamaan näiden kahden tekijän välisen kompromissin avulla. (Simpson et al. 2006, s. 154)

Krishnapillai ja Zeid (Krishnapillai et al. 2006) esittävät tuoteplatformin määrittävien tuotteiden räätälöimispotentiaalia kuvaavan indeksin (DCI, *Design customization index*). Tässä menetelmässä arvioidaan QFD-menetelmän tyypillisesti tuotteen teknisten

ratkaisuiden sekä suunnitteluparametrien vaikutusta siihen, kuinka tuote toteuttaa asiakastarpeita. Toisin sanottuna, pyrkimyksenä on selvittää, mitkä suunnitteluparametreista ovat niitä, jotka voimakkaimmin vaikuttavat tuotteen ominaisuuksiin asiakkaan näkökulmasta. Tulosten avulla voidaan mm. päättää, mitkä parametrit kannattaa valita tuotemäärittelyssä käytettäväksi parametreiksi. (Krishnapillai et al. 2006, s. 30–35)

Krishnapillai ja Zeid (Krishnapillai et al. 2006) luokittelevat skaalautuvaan tuotteeseen liittyvät parametrit viiteen kategoriaan sen mukaan, kuinka ne ovat riippuvaisia toisistaan. Luokan 1 parametrit ovat ”tuotealustaparametreja” (*Platform parameters*), joiden avulla varsinainen tuotteen määrittely tapahtuu. Luokan 2 parametrit eli ”muunneltavat parametrit” (*Customizable parameters*) ovat riippuvaisia sekä luokan 1 parametreista että muista tuotetta määrittävistä parametreista, joita ei kuitenkaan käytetä skaalautuvan tuotteen määrittelyssä. Luokan 3 parametrit ovat ei-muunneltavia parametreja (*Uncustomizable parameters*), joiden arvot ovat riippuvaisia suoraan muista parametreista. Luokan 4 parametrit ovat riippuvaisia tuotteen itsenäisistä parametreista eli luokan 5 parametreista, joilla ei ole riippuvuuksia muihin parametreihin. Kaikkia parametrityyppisiä ei välttämättä esiinny kaikissa tuotteissa, vaan suunnitteluavaruus voi koostua esimerkiksi pelkästään luokkien 1, 2 ja 3 parametreista. Kokonaisuudessaan tuotteiden voidaan katsoa olevan hyvin räätälöitävissä silloin, kun niiden parametrit ovat mahdollisimman itsenäisiä, eli monimutkaisia ja laajoja riippuvuussuhteita parametrien välillä on mahdollisimman vähän. (Krishnapillai et al. 2006, s. 34–35)

2.4. Suunnitteluautomaatiojärjestelmät ja niiden kehittäminen

Kuten luvussa 2.2 todettiin, on massaräätelöinnin suuntaan siirtymisessä mahdollisuutena tehostaa yrityksen toimintaa esimerkiksi automatisoimalla tuotevarianttien suunnittelua. CAD-mallien ja valmistusdokumenttien tuottamisen automatisoiminen on mahdollista erilaisia suunnitteluautomaatteja hyödyntäen. Tässä luvussa tarkastellaan, millaisia menetelmiä ja vaihtoehtoja suunnitteluautomaation toteuttamiselle ja kehittämiseksi on erilaisissa tilanteissa, sekä kuinka voidaan mahdollisesti arvioida erilaisten ratkaisuiden vaikutuksia järjestelmän elinkaareen ja käytettävyyteen.

Hvam, Mortesen ja Riis (Hvam et al. 2008) esittävät 7-vaiheisen menetelmän, jonka avulla voidaan määritellä yrityksen tarpeisiin soveltuva konfigurointijärjestelmä. Lähtökohtana kehitykselle on, että tuotteisto, johon konfigurointia ollaan soveltamassa, perustuu modulaarisiin tuoteperheisiin ja soveltuu siten suunnitteluautomaation kohteeksi. Kehitystyö alkaa määrittelemällä, millaisia prosesseja yrityksen toimintaan liittyy, ja tutkimalla, missä niistä konfiguraattorin käytöllä voidaan saavuttaa hyötyjä. Toisessa vaiheessa tutkitaan yrityksen tuotteistoa selvittämällä erityisesti, millaisia riippuvuuksia eri tuotevariaatioilla on keskenään. Erityisenä kiinnostuksen kohteena on selvittää, mitkä komponentit ja osakokonaisuudet ovat sellaisia, jotka mahdollisesti esiintyvät tietyn tuoteperheen kaikissa tuotteissa, ja millä tavalla osakokonaisuudet ovat vaihdeltavissa

eri tuotevarianttien välillä. Tuotteista pyritään muodostamaan niiden rakenteet *asiakkaan, suunnittelun ja valmistuksen* näkökulmista. (Hvam et al. 2008, s. 58–63)

Kolmannessa vaiheessa edellisessä kohdassa muodostetut tuotemallit mallinnetaan hyödyntäen oliomallinnusta. Neljännessä vaiheessa muodostetaan UML-mallien avulla määrittelyt sille, millaisia vaatimuksia tuotteisto ja sen keskinäiset riippuvuudet muodostavat konfigurointiohjelmistolle. Tämän avulla voidaan päättää ohjelmiston valinnasta (tai sen itse tekemisestä). Viides vaihe käsittää edellisissä kohdissa muodostettujen tietojen avulla konfigurointiohjelmiston ohjelmointi- ja räätälöintityön. Viimeiset kaksi vaihetta koostuvat ohjelmiston käyttöönotosta sekä ylläpito- ja kehitystyöstä. (Hvam et al. 77–84)

Sunnersjö (2012) esittää top-down-tyyppisen menetelmän suunnitteluautomaatiojärjestelmän suunnittelun tueksi. Pääpaino on suunnittelutiedon käsittelyllä ja siinä, kuinka suunnittelutieto saadaan muutettua sellaiseen muotoon, että se kelpaa sovellettavaksi suunnitteluautomaatiokäyttöön. Sunnersjö korostaa, että kehityksen alkuvaiheissa on käytettävä riittävästi aikaa ja resursseja siihen, että määritellään, mitä järjestelmän käyttönotolla tavoitellaan, ja millaisilla menetelmillä haluttuihin lopputuloksiin voidaan päästä. Ennen kaikkea tulee keskittyä siihen, millaista hyötyä järjestelmästä on yrityksen liiketoiminnalle. (Sunnersjö 2012, s. 123–125)

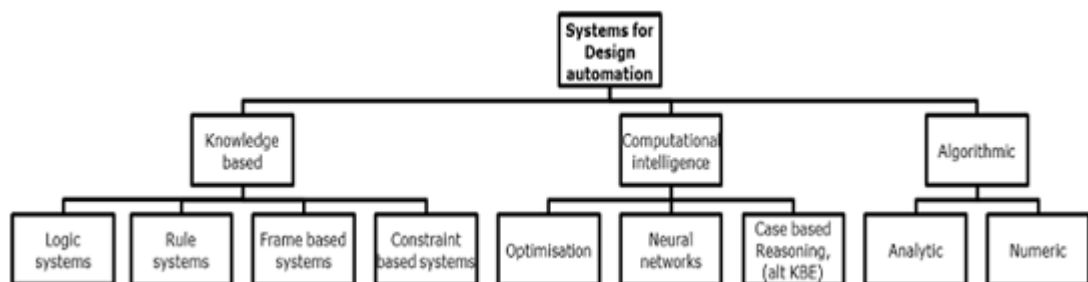
Sunnersjön (2012) mukaan oleellinen haaste suunnitteluautomaatiojärjestelmän kehittämisessä on siinä, kuinka tuotteen suunnitteluvaiheessa tarvittavaa tietoa hallitaan ja käsitellään siten, että järjestelmään syötettyjen tietojen kautta saadaan haluttu lopputulos, joka vastaa laadultaan ja toimivuudeltaan tilannetta, jossa ihminen vastaisi tuotevariantin suunnittelusta. Tuotteen suunnittelemiseksi tarvittava tietämys joudutaan Sunnersjön (2012) mukaan lähes poikkeuksetta käsittelemään ja muuttamaan toisenlaiseen muotoon, jotta siitä tulisi kelvollista suunnitteluautomaatiojärjestelmiä varten. Esimerkiksi suunnittelijan kokemukseen perustuvan tiedon esittäminen automatisoituvaksi kelpaavassa muodossa voi olla hyvinkin haasteellista. (Sunnersjö 2012, s. 125–128)

Kun suunnitteluautomaatin toteuttamiseksi tarvittava tieto on saatu kerättyä kasaan ja saatettua sellaiseen muotoon, että se kelpaa suunnitteluautomaatiokäyttöön, on tieto vielä luokiteltava sen tyyppin mukaan, jotta voidaan valita oikeanlainen järjestelmän toteutustapa suunnittelutiedon hallintaan. Eri tietotyypeille soveltuvia ohjelmistotyyppisiä on esitetty kuvassa 2.4.1. Kuvassa 2.4.2 on esitetty erityyppisiä suunnitteluautomaatiojärjestelmiä sen mukaan, kuinka ne käsittelevät tietoja. (Sunnersjö 2012, s. 125–132)

Knowledge categories:	Solution methods:	Neural network	Case based reasoning	Data base	Parametric solid modeller	Traditional, procedural	KBE, constraint-based
Tacit		■	□				
Comparative		□	■	□			
Experimental			□	■			
Geometrical					■	□	
Mathematical		□		□		■	□
Heuristic			□			□	■

■ -High relevance
 □ -Some relevance

Kuva 2.4.1: Mahdollisia suunnittelutiedon tyyppejä (Sunnnersjö 2012, s. 130)



Kuva 2.4.2: Suunnitteluautomaatiojärjestelmien tyyppejä (Sunnnersjö 2012, s.129)

Kun suunnittelutiedolle on löydetty sopivat käsittelymenetelmät, voidaan siirtyä varsinaiseen työhön eli järjestelmän rakentamiseen. Järjestelmää kehitettäessä on syytä analysoida, mitkä osat tuotteen suunnitteluprosessista sekä mitkä suunnittelumuuttujat ja -parametrit ovat riippuvaisia toisistaan, jotta saadaan selville optimaalinen tietojen määrittelyjärjestys. Tämän järjestyksen selvittämiseen voidaan käyttää esimerkiksi kuvan 2.4.3 kaltaista DSM-matriisityökalua, johon kirjataan suunnittelu-/määrittelyprosessin eri vaiheet. Tämän jälkeen matriisi pyritään saattamaan muotoon, jossa kaikki riippuvuudet ovat diagonaalien alapuolella. (Sunnnersjö 2012, s. 130–132)

Kuva 2.4.3: Esimerkki DSM-matriisityökalusta (Sunnensjö 2012, s. 131)

Cederfeldt (2004) syvennyy enemmän suunnitteluautomaatiojärjestelmän toimintaan CAD-järjestelmän näkökulmasta. Tässäkin yhteydessä järjestelmän kehittämisen oleellinen osa on suunnittelutiedon saattaminen sellaiseen muotoon, että sitä voidaan hyödyntää CAD-suunnitteluautomaatiossa sekä suunnittelutiedon laatua vastaavan ratkaisumenetelmän valitseminen (katso kuva 2.4.1). Lisäksi Cederfeldt mainitsee alkuvaiheessa tärkeäksi pohtia sitä, kuinka laajalle alueelle yrityksen toimintaa suunnitteluautomaatio ulottuu sekä kuinka pitkälle automatisoituja malleista tehdään. (Cederfeldt 2004, s. 3–13; Cederfeldt et al. 2005, s. 1-4)

2.4.1. Järjestelmien käytettävyys

Järjestelmän käytettävyyttä ja helppokäyttöisyyttä voidaan mitata monella tasolla riippuen siitä, mitä käyttäjä missäkin tilanteessa järjestelmältä odottaa. Järjestelmän peruskäytön helppous on hyvin tärkeää, sillä huonosti käytettävä järjestelmä ei pidemmän päälle kannusta ketään käyttämään järjestelmää eikä myöskään anna hyvää vaikutelmaa järjestelmän laadusta.

Hvam et al. (2008) mukaan käytettävyyttä ja käyttäjästävällisyyttä voidaan kuvata siten, kuinka helppoa järjestelmällä operoiminen (ns. peruskäyttö) on. Lisäksi käytettävyyden kannalta oleellista on se, kuinka suuria odotusaikoja tuotekohtaisten mallien muodostamiseen liittyy sekä kuinka hyvin tukea käyttäjille on ongelmatilanteissa tarjolla. (Hvam et al. 2008, s. 76–77)

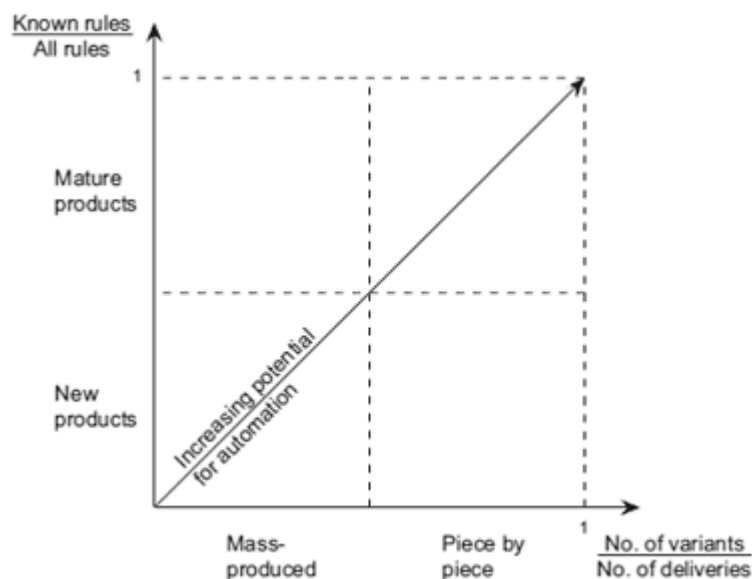
Cederfeldt (2004) mainitsee käytettävyyden ja muokattavuuden kannalta olennaiseksi järjestelmän läpinäkyvyyden, jolla tarkoitetaan sitä, kuinka helposti järjestelmään sisällytetty tieto on käyttäjän löydettävissä. Vaikka läpinäkyvyydellä ei olisi suoranaista vaikutusta järjestelmän peruskäytön helppouteen, tulee se kuitenkin vaikuttamaan siihen, kuinka helposti esimerkiksi tuotteeseen tulevat muutokset saadaan päivitettyä järjestelmään. Läpinäkyvyyttä voi helposti parantaa pienillä asioilla, kuten esim. järjestelmän muuttujien loogisella nimeämisellä ja dokumentoimisella. Käyttäjän kannalta tiedon jäljittäminen on huomattavasti helpompaa, mikäli muuttujat on nimetty kuvaavasti

ja johdonmukaisesti (esim. length_1 vs. d28). Järjestelmän toiminnasta tehty, järjestelmästä erillään pidettävä dokumentaatio parantaa myös järjestelmän läpinäkyvyyttä. (Cederfeldt 2004, s. 3-11)

2.4.2. Järjestelmien elinkaari

Kun arvioidaan suunnitteluautomaatiojärjestelmän elinkaarta, on ensimmäiseksi syytä verrata järjestelmän elinkaarta siihen, kuinka usein tuotteistossa odotetaan tapahtuvan muutoksia. Mikäli tuote on konseptiltaan hyvin kehittynyt ja saavuttanut ajan saatossa sellaisen rakenteen, jonka ei odoteta radikaalisti muuttuvan, ei suunnittelujärjestelmän elinkaaren odoteta olevan tuotteen ja tuoterakenteen rajoittama. (Hvam et al. 2008, s. 113)

Cederfeldt (2004) esittää kuvan 2.4.4 mukaisella kuvaajalla, kuinka potentiaali suunnitteluautomaatiojärjestelmille on suurimmillaan silloin, kun tuotteet ovat elinkaarellaan kypsässä vaiheessa, jolloin suuria uudistuksia tuotteeseen ei ole heti odotettavissa. Tällöin tuotevarianttien suunnittelu on hyvin rutiininomaista ja tuotteiden suunnitteluprosessi sekä sen aikana tarvittavat tiedot voidaan määritellä riittävän tarkasti suunnitteluautomaatiojärjestelmän kehittämistä varten.



Kuva 2.4.4: *Potentiaali suunnitteluautomaatiojärjestelmän hyödyntämiselle (muokattu Cederfeldt, 2004 s. 2)*

Suunnittelujärjestelmän elinkaari voi riippua myös muista kuin tuotteeseen liittyvistä tekijöistä, kuten esimerkiksi ohjelmistoympäristöön tai tiedon esittämiseen liittyvistä tekijöistä. Kuten aikaisemmissa luvuissa on todettu, on suunnitteluautomaatiojärjestelmän kehittämisen kannalta tärkeää, että kehityksen alkuvaiheissa tehdään oikeita valintoja järjestelmän kehittämisen suhteen. Näihin valintoihin kuuluu myös se, millaista tietoa järjestelmään halutaan tallentaa ja kuinka tietoa hallitaan. Tiedon esittämisellä on järjestelmän elinkaaren kannalta suuri merkitys, sillä mikäli myöhemmissä vaiheissa ilmenee tarve tallettaa järjestelmään jotain sellaista tietoa, joka ei ole järjestelmän tek-

nisten rajoitusten vuoksi mahdollista, saattaa tietojärjestelmän muuttaminen olla jopa mahdotonta. Siksi järjestelmän elinkaaren kannalta on tärkeää tunnistaa jo alkuvaiheissa, mikä osa suunnittelutiedosta on sellaista, joka ei ajan kuluessa tule muuttumaan, ja mikä vastaavasti saattaa olla myöhemmin muutosten kohteena. (Hvam et al. 2008, s. 141)

Cederfeldt (2004) puolestaan korostaa, että järjestelmän elinkaaren kannalta on oleellista, onko tuotevarianttien muodostamiseen tarvittava tieto säilytettynä erillään vai integroituna johonkin muuhun (esim. CAD-) järjestelmään. Mikäli tämä tieto säilytetään muista järjestelmistä erillään ja suunnitteluautomaatiojärjestelmä toimii omana kokonaisuutenaan muiden järjestelmien ohessa, voidaan esimerkiksi CAD- tai PDM-järjestelmiä vaihdettaessa suunnitteluautomaatin tieto saada käyttöön myös uudessa ympäristössä toisin kuin silloin, mikäli tieto on sidottuna johonkin tiettyyn järjestelmään. (Cederfeldt 2004, s. 11)

Amadori et al. (2012) esittää, että suunnitteluautomaatiossa käytettävien CAD-mallien tulisi olla joustavia ja robusteja. Robustiutta voidaan mitata yksinkertaisesti siten, että testataan mallia erilaisilla parametri- tai syötearvojen yhdistelmillä ja tutkitaan, kuinka monta kertaa malli päivityksen yhteydessä kaatuu. Mallin elinkaaren kannalta kiinnostavampana voidaan pitää mallin joustavuuden mitattavuutta. Joustavuudelle annetaan tässä yhteydessä määritelmä mallin suunnitteluavaruuden koon avulla. Tällöin mallin kutakin parametria vertaillaan tutkimalla niiden mahdollisia ääriarvoja valitun referenssipisteen suhteen. Tällä menetelmällä voidaan vertailla samasta tuotteesta tehtyjä suunnittelumalleja. Käytännössä samasta tuotteesta tehtyjen mallien vertailu voisi tulla kyseeseen etenkin esimerkiksi silloin, kun mallin ei tarvitse olla erityisen laaja (pieni kokoonpano, vähän osia) tai halutaan ennakoida eri tietotyyppien vaikutuksia mallin käyttäytymiseen. (Amadori et al. 2012, s. 190–192)

2.4.3. Yhteenveto, suunnittelu järjestelmät

Kuten missä tahansa tuotekehitysprojektissa, myös suunnitteluautomaatiojärjestelmän kehittämisessä projektin alkuvaiheessa tehdyt ratkaisut vaikuttavat suuresti saatuun lopputulokseen. Lähtökohtana suunnittelun automatisoimiselle on strateginen päätös tehostaa yrityksen toimintaa esimerkiksi automatisoimalla rutiininomaisia toistuvia suunnittelutehtäviä, jolloin resursseja voidaan vapauttaa muuhun käyttöön sekä saavutetaan nopeampia läpäisyajoja. Lisäksi perusedellytyksenä on, että tuotteet, joiden suunnittelua ollaan automatisoimassa, ovat joko modulaarisia tai skaalautuvia/parametrisiä, jolloin tuotevariaatioiden muodostaminen onnistuu helpommin. Riippumatta siitä, minkä tyyppistä suunnitteluautomaatiojärjestelmää ollaan kehittämässä, on tärkeää heti projektin alussa määritellä seuraavat järjestelmän määrittelyyn vaikuttavat asiat: (Hvam et al. 2008, s. 58; 62–64; Sunnersjö 2012, s. 123–124; Cederfeldt et al. 2005, s.1)

- mihin tarkoitukseen järjestelmää tullaan käyttämään?

- kuinka yksityiskohtaisia järjestelmällä tuotettavien mallien tulee olla?
- millaista suunnittelutietoa tuotteeseen liittyy ja kuinka sitä voidaan esittää?
- millaista tiedonkäsittelyä tarvitaan, jotta halutut mallit voidaan muodostaa suunnittelutiedon avulla?

Yksi keskeisimpiä haasteita suunnitteluautomaatiojärjestelmän valinnassa tai toteutamisessa on suunnittelutiedon muokkaaminen kelvolliseksi suunnitteluautomaatiosovelluksia varten sekä varmistuminen siitä, että kaikki oleellinen tieto tuotteen määrittämiseksi on saatavilla. Kun tiedot on saatu siihen muotoon, että niitä voidaan käyttää tuotevarianttien muodostamiseen, tulee valita oikeat ratkaisumenetelmät, joilla saatua tietoa voidaan käsitellä.

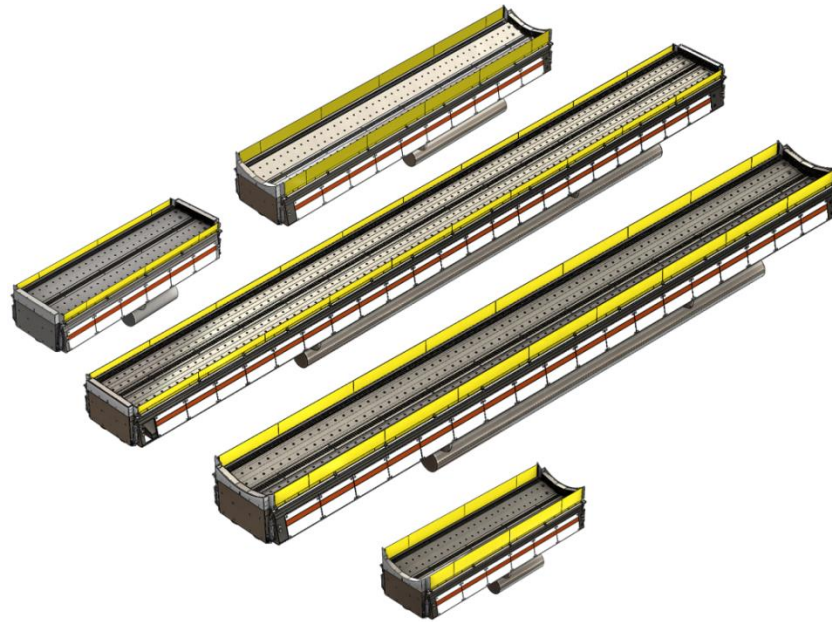
3. SUUNNITTELUMALLIN KEHITTÄMINEN

Tässä luvussa esitellään tuote, josta parametrisesti ohjautuva suunnittelumalli on tarkoitus toteuttaa. Luvussa perehdytään tuotteen toimintaan siltä osin kuin se on olennaista suunnittelumallin kehittämisen kannalta sekä määritellään suunnittelussa tarvittavat parametrit ja niiden raja-arvot. Lisäksi perehdytään suunnittelukäytössä olevaan ohjelmistoon sekä siihen, millaisia vaihtoehtoja parametrisesti ohjautuvan suunnittelumallin kehittämiseksi tässä ympäristössä on.

3.1. Tuotteen toiminta ja esittely

Kostutinpalkit kuuluvat Metso Automationin Profilers-tuotteisiin, joita käytetään paperintuotannon laadunhallinnassa. Kostutinpalkkia käytetään paperiradan kosteuden säätömiseen. Kostutinpalkin suuttimista suihkutetaan paineilman avulla vettä paperiradalle, jolloin yksittäisen suuttimen vesimäärää säätelemällä voidaan säätää kosteusprofiilia tasaisemmaksi koko radan leveydeltä. Radan kosteusprofiilin säätämisen lisäksi kostutinpalkilla voidaan hallita paperin käyristymää tai käyttää kostutinta puhtaasti lisäkostutukseen.

Kostutinpalkkien tuoteperheen valikoima koostuu kahdella ja neljällä suutinrivillä varustetuista palkeista, joista 4-rivistä palkkia käytetään niissä kohteissa, joissa tarvitaan suurempia vesimääriä tai tarkempaa resoluutiota kosteusprofiilin säädössä. Kostutinpalkki asennetaan yleensä paperikoneen kuivatusosalle joko telaa (kuivatussyylinteriä) vasten tai suoraan kulkevalle paperiradan osuudelle. Kuvassa 3.1.1 on esitetty muutamia 4-rivisiä kostutinpalkkeja eri radan leveyksille sekä asennuspaikoille (suora pinta vs. kaareva pinta).



Kuva 3.1.1: 4-rivisiä kostutinpalkkeja

Kostutinpalkkeja on saatavilla varustettuna sumunpoistolla sekä ilman sumunpoistoa. Sumunpoiston tarkoituksena on imeä kostutusalueelta pois ylimääräinen vesi, joka ei ole imeytynyt paperirataan, jotta vesipisarat eivät vuotaisi kostutinpalkin ulkopuolelle ja sotkisi siten paperirataa. Kostutinpalkit, joissa ei ole sumunpoistoa, ovat lähestulkoon aina 2-rivisiä palkkeja, sillä neljällä suutinrivillä veden ja sumun määrä on niin suuri, että sumunpoisto on lähes välttämätön. Lisäksi palkeista on ollut saatavilla sellaisia malleja, joissa suuttimien vesimäärää säätelevät toimilaitteet on integroitu palkin sisälle. Tämä vaihtoehto on kuitenkin huomattavasti harvinaisempi, sillä palkin sisälle asennetut toimilaitteet kasvattavat palkin kokoa, mikä vaikeuttaa sopivan asennuspaikan löytämistä useimmissa paperikoneissa. Lisäksi toimilaitteiden kunnonvalvonta ja huolto on huomattavasti helpompaa niiden sijaitessa erillisessä toimilaittekaapissa.

Kostutinjärjestelmään kuuluvat kostutinpalkin lisäksi oheislaitteet, joihin sisältyvät suutinilmaa tuottavat puhallinyksiköt, suuttimille menevää vettä kontrolloiva vesikeskus, suuttimia ohjaavien toimilaitteiden kenttäkaappi, palkin liikuttelulaitteistojen ohjauskaapit sekä sumunpoiston imupuhallinyksikkö. Oheislaitteita (esim. puhallinyksikkö) on mitoitettu eri palkkikokojen mukaan ja ne valitaan aina palkin suutinmäärän mukaan. Lisäksi asennuspaikasta riippuen järjestelmään voi kuulua muita lisävarusteita, kuten esimerkiksi höyrylämmitteinen tippakaukalo, jolla estetään kostutusalueen ulkopuolelle päässeestä sumusta tiivistyneiden vesipisaroiden tippuminen paperiradalle kostutinpalkin alapuolelle.

Kostutin- ja muita Profilers-järjestelmiä myydään osana paperikoneiden tehostus- ja modernisointiprojekteja, joten ne on räätälöitävä kussakin tapauksessa paperikoneeseen sopiviksi. Kostutinpalkkien vuosittaiset myynti- ja valmistusmäärät eivät ole kovin suuria – vuodesta riippuen puhutaan kymmenistä kappaleista.

3.1.1. Kostutinpalkin suunnittelu

Kostutinpalkit ovat tähän asti olleet projektikohtaisesti asiakkaiden tarpeisiin räätälöityjä tuotteita. Palkki on suunniteltu jokaisessa projektissa kyseisen paperikoneen rataleveys sekä asennuspaikan tilavaatimukset huomioiden. Lisäksi jokaiseen projektiin suunnitellaan kostutinpalkin liikuttelulaitteisto (pneumaattinen tai hydraulinen) sekä oheislaitteet, kuten vesi- ja ilmakeskukset.

Uuden projektin alussa kostuttimen tekninen määrittely sisältää seuraavat asiat:

- kostuttimen tyyppi (2-/4-rivinen, sumunpoistolla/ilman sumunpoistoa)
- kosteudensäätyvyöhykkeen leveys (30 mm/60 mm/120 mm)
- koneella ajettavat rataleveydet (minimi - maksimi)
- vesi- ja ilmaliityntöjen sijainti (hoitopää/käyttöpää)
- suuttimien numeroinnin suunta (hoitopäästä alkaen/käyttöpäästä alkaen)
- ilma- ja sumunpoistopuhaltimien käyttöjännite
- liikuttelulaitteiston tyyppi (pneumaattinen/hydraulinen)

Kostutinpalkin suunnitteluun on olemassa lyhyt suunnitteluohjeisto, joka määrittelee sen, mitkä osat säilyvät rataleveyden muuttuessa vakioina, ja kuinka rataleveyden muutokset vaikuttavat muuttuvien komponenttien ja alikokoonpanojen määrään. Lisäksi kostutinpalkin eri varianteille (2- ja 4-riviset palkit) on olemassa PDM-järjestelmään tallennettuna mallidokumentit, joiden pitäisi toimia lähtökohtina, kun uuden kostutinpalkin suunnittelu alkaa. Kostutinpalkkien projekteja ei kuitenkaan pääsääntöisesti viellä PDM-järjestelmään, vaan dokumentit ovat tallennettuina verkkolevyllä, ja piirustusnumeroiden hallinta tapahtuu manuaalisesti.

Nykyisellä toimintatavalla kostutinpalkin projektikohtainen mekaniikkasuunnittelu etenee käytännössä siten, että suunnittelija ottaa projektiin lähtökohdaksi jonkun vanhan projektin, jonka kostutinpalkki on mitoiltaan (rataleveys, telan halkaisija) lähellä projektissa tarvittavaa. Tämän jälkeen lasketaan Excel-taulukoiden avulla suutinilmamäärän vaatima ilmansyöttöputken halkaisija sekä sumunpoiston tarvitsema pinta-ala. Mallit päivitetään komponentti ja kokoonpano kerrallaan uusia mittoja vastaaviksi, minkä jälkeen osien piirustukset päivitetään tai tehdään kokonaan uudestaan.

Kostutinpalkin suunnitteluun on olemassa hyvin vähän kirjoitettua suunnittelusääntöä, minkä vuoksi suunnitteluratkaisut ovat aina jossain määrin riippuvaisia projekti-insinööristä, eivätkä kaikki hyväksi todetut ratkaisut välttämättä tule päivitettyiksi malliprojekteihin. Tästä seuraa, että mikäli suunnittelija vaihtuu projektien välillä, saattavat vanhat jo hylätyt ratkaisut ja sitä kautta suunnitteluvirheet toistua myös uusissa projekteissa. Lisäksi se, että yleensä nopein tapa luoda uuden projektin mallit on ottaa lähtökohdaksi jonkin vanhan (yleensä ei viimeisimmän) projektin dokumentit, ei edesauta uuden tiedon päivittymistä malleihin.

3.1.2. Tavoitteiden määrittely

Kostutinpalkin suunnittelun automatisointi toteutettiin osana tuotekehitysprojektia, jonka tarkoituksena oli kehittää kostutinpalkin rakennetta siten, että voitaisiin saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä kostutinpalkin valmistuskustannuksissa sekä saataisiin kostutinpalkin projektikohtaiseen mekaniikkasuunnitteluun kuluvia tunteja vähennettyä 40 %.

Parametrien mukaisesti ohjautuvan suunnittelumallin kehittämisen lisämotiivina oli se, että suunnittelijan vaihtumisesta johtuvat muutokset kostutinpalkin rakenteissa saataisiin karsittua pois. Lisäksi toiveena oli, että parametrisesti ohjautuvat mallit saataisiin toimimaan Aton PDM-järjestelmässä, jolloin manuaalisen työn osuus esimerkiksi osaluetteloiden täyttämisen osalta vähenisi.

3.2. Parametrien määrittely

Kuten luvussa 2.3.3 mainittiin, voidaan skaalautuvan tuotteen parametreja jaotella sen mukaan, mitkä ovat parametrien keskinäiset riippuvuudet. Sellaiset parametrit, joilla on laajimmat vaikutukset tuotteen rakenteeseen ja skaalattavuuteen ovat niitä, jotka tulisi valita tuotteen skaalauksessa määritettäväksi parametreiksi. Tässä luvussa esitellään kostutinpalkin määrittelyn kannalta tärkeimmät parametrit sekä niiden ääriarvot.

3.2.1. Rataleveys

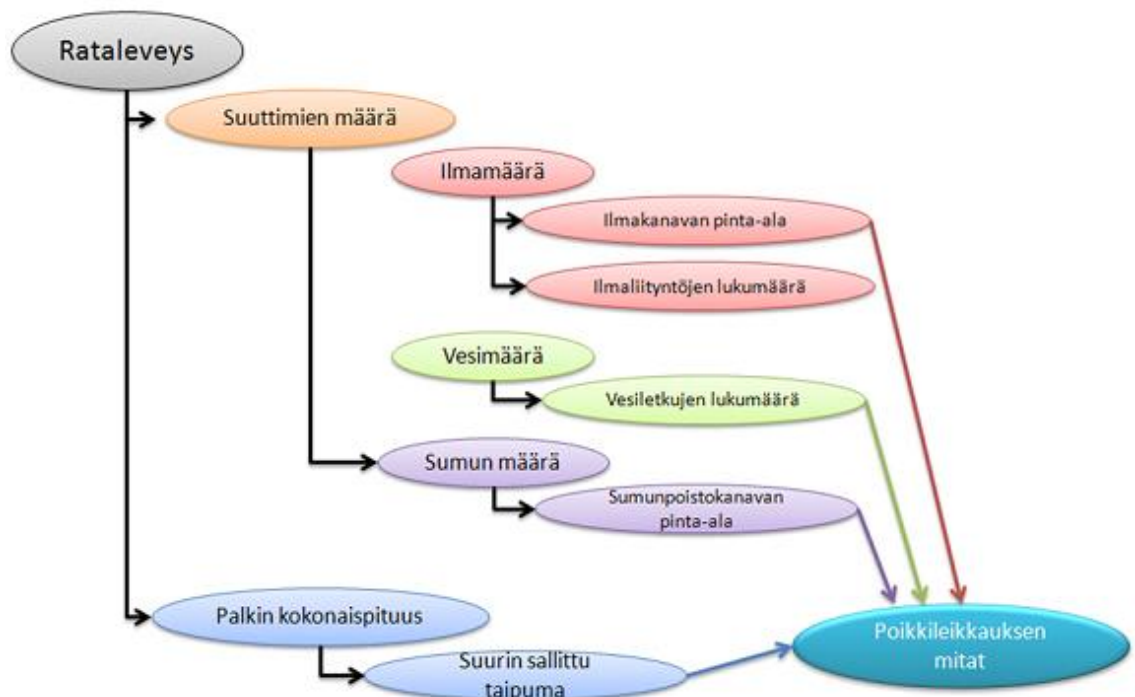
Tärkeimpänä parametrina kostutinpalkin määrittelyssä on rataleveys, jolle palkki suunnitellaan. Kostutinpalkki pyritään suunnittelemaan aina siten, että etäisyys palkin ensimmäisen suuttimen keskikohdasta viimeisen suuttimen keskikohtaan on sama kuin suurin mahdollinen ajettava rataleveys paperikoneella. Mikäli paperikoneella tehdään esimerkiksi useampia erilaisia paperilaatuja, jolloin rataleveys vaihtelee, varustetaan kostutinpalkki suihkunsäädöllä, jolloin reunimmaisten suuttimien osalta voidaan säätää suihkun leveyttä peittämällä osa reunimmaisten suuttimien peittoalueesta. Pienimmät rataleveydet ovat noin 1200 mm ja suurimmat tarvittavat rataleveydet suuruusluokkaa 10500 mm. Suurimmaksi osaksi myytävien palkkien rataleveydet ovat välillä 6000–8000 mm.

Yhdessä suutinrivissä kahden peräkkäisen suuttimen väli on 120 mm, jolloin 4-rivisessä kostutinpalkissa rataleveyksien vaihteluväliksi tulee 30 mm. Suuttimien välin arvo johtuu suuttimien toiminnasta, sillä tällä etäisyydellä saavutetaan optimaalinen säädettävyys, eivätkä kahden peräkkäisen suuttimen virtaukset vielä häiritse toisiaan.

Palkin rakenteesta johtuen valitaan minimirataleveydeksi 1020 mm, sillä mikäli palkista tehtäisiin lyhyempi, ei palkin pituussuunnassa olisi riittävästi tilaa kaikille palkin pohjalevyn liitynnöille eli ilma-, vesi- ja sumunpoistoliitynnöille, sekä pohjan puhdistusluukuille. Maksimipituudeksi valitaan alustavasti 10500 mm, sillä mikäli rataleveydessä mennään paljon pidemmälle, jouduttaisiin palkin runko suunnittelemaan paljon jäykemmäksi, jotta pysyttäisiin sallituissa taipuman rajoissa. Suuttimien täytyy olla tie-

tyllä etäisyydellä paperiradan pinnasta, joten mikäli palkin taipuma olisi suuri (~5mm), ei keskimmaisilla suuttimilla saavutettava säädettävyys enää olisi riittävällä tasolla. Mikäli taipumaa tulisi saada pienennettyä, jouduttaisiin poikkileikkauksen mittoja kasvattamaan, mikä lisäisi tarpeetonta painoa ja vaikeuttaisi palkin sijoittamista. Poikkileikkauksen mittoja voitaisiin suunnittelumallin toiminnan rajoissa todennäköisesti muuttaa ratalevyden muuttuessa, mutta ainakin alustavasti pitäydytään siinä, että poikkileikkauksen korkeus pysyy samana kaikilla ratalevyksillä, jotta voidaan käyttää kaikissa varianteissa samoja vakiokokoisia huoltoluukkuja.

Ratalevyys on myös rakenteen suunnittelun kannalta olennaisin ja keskeisin muuttuja. Kuva 3.2.1 hahmottaa ratalevyden vaikutusta kostutinpalkin eri ominaisuuksiin sekä mittoihin.



Kuva 3.2.1: Ratalevyden vaikutus kostutinpalkin mittoihin

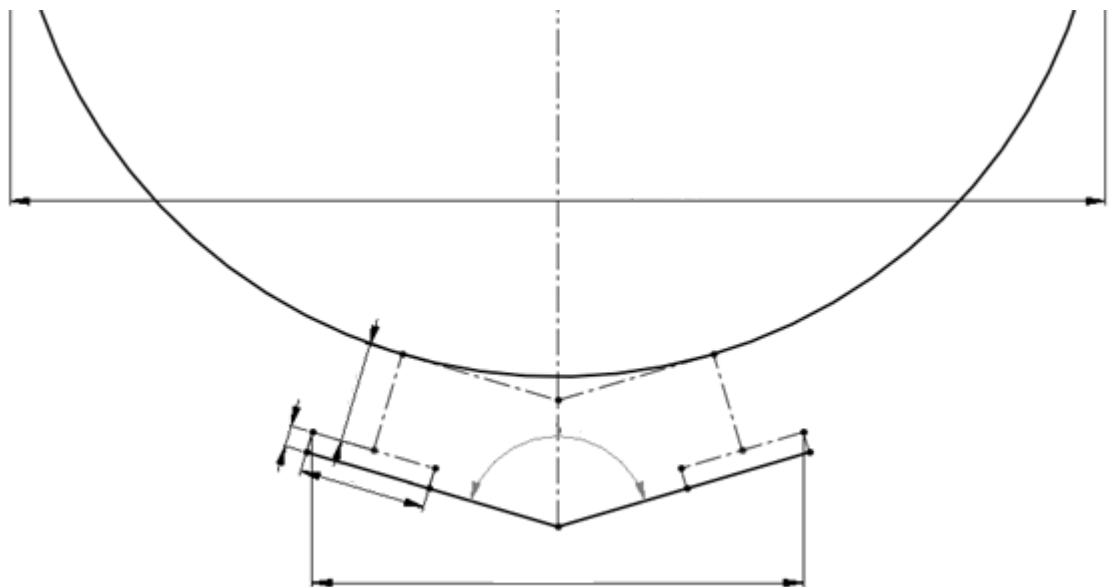
Ratalevyys vaikuttaa suoraan suuttimien lukumäärään ja sitä kautta suuttimien tarvitseman veden ja ilman määrään. Suuttimien tarvitseman ilman määrä taas vaikuttaa siihen, kuinka suuri palkin sisällä kulkevan ilmakanavan poikkileikkauksen on oltava, jotta suuttimille syötettävän ilman virtausnopeus pysyy halutulla alueella. Syötettävän ilman määrää ei säädellä suutinkohtaisesti, vaan kaikille suuttimille jaetaan ilma samasta kanavasta.

Kosteusprofiilin säätämiseksi suuttimien toimintaa ohjataan säätämällä suuttimelle syötettävää vesimäärää toimilaitteiden avulla. Vesimäärää säätäviä toimilaitteita on sovelluksesta riippuen joko jokaiselle tai joka toiselle suuttimelle. Kostutinpalkin sisällä vesiletkuja kulkee yhtä monta kuin palkissa on suuttimia. Tästä seuraa luonnollisesti se, että palkin sisällä on oltava riittävästi tilaa vesiletkuille, minkä lisäksi vesiletkujen liittimet on mahdollista asentamaan myös viimeisiin suuttimiin vesiletkujen ollessa palkin sisällä.

Rataleveys ja suuttimien määrä vaikuttavat myös syntyvän sumun määrään. Koska paperiradan aiheuttaman ilmavirtauksen vuoksi kaikki suuttimille syötetty vesi ei imeydy paperirataan, tiivistyy kostutusalueelle kertyvä sumu ajan myötä vesipisaroiksi. Mikäli tiivistyneitä vesipisaroita pääsee putoamaan suutinsumun sekaan, saattaa pahimmassa tapauksessa aiheutua ratakatko. Tämän vuoksi ylimääräinen sumu imetään pois kostutusalueelta. Mitä enemmän suuttimia palkissa on, sitä enemmän on sumunpoistoputkessa oltava pinta-alaa, jotta sumunpoisto on riittävän tehokas.

3.2.2. Telan halkaisija – asennuspaikka

Kostutinpalkin asennuspaikka määrittelee, tuleeko palkki paperikoneessa telaa (kuiva-tussylinteriä) vasten vai paperiradan suoraan kulkevalle osuudelle. Mikäli palkki asennetaan telaa vasten, on 4-rivisen kostutinpalkin puolikkaiden (2 suutinriviä per puolikas) välillä oltava tietty kulma, jotta jokaisen suutinrivin etäisyys telan pintaan on optimaalinen – palkin taipuma huomioiden. Telan halkaisijat voivat vaihdella välillä 1200–1830 mm. Palkin puolikkaiden välinen kulma voidaan laskea kuvan 3.2.2 mukaisesta geometriasta kun tiedetään telan halkaisija, suuttimen kokonaiskorkeus (joka koostuu suuttimen kärjen korkeudesta sekä siitä etäisyydestä, joka tarvitaan suutinkuvion kehittymiseksi) sekä kauimmaisten suutinrivien välinen etäisyys. Suutinrivien etäisyys on asetettu niin pieneksi kuin mahdollista, jotta palkin poikkileikkaus saataisiin mahdollisimman pieneksi. Mikäli suutinrivejä tuotaisiin lähemmäksi toisiaan, alkaisivat suutinrivien virtaukset häiritä toisiaan, jolloin paperiradan kulkusuunnassa viimeisellä suutinrivillä ei enää saavutettaisi riittävää säätövastetta.



Kuva 3.2.2: Suutingeometrian vaikutus palkin mittoihin

Mikäli kulma lasketaan suoraan kuvan geometriasta, ei kulman arvoksi saada tasalukuja, mikä aiheuttaisi sen, että osien sopivuudessa tulisi kokoonpanovaiheessa toden-

näköisesti ongelmia, koska yksittäisten osien valmistusepätkkuudet kertautuisivat. Tämän vuoksi puolikkaiden väliselle kulmalle valittiin arvot niin, että palkin taipuman ja kulman poikkeaman välinen yhteisvaikutus pysyi halutuissa rajoissa. Suuttimen etäisyyden sallittiin olla 1,5 mm ideaalimitta lähempänä rataa tai 5 mm kauempana radasta kun palkin laskennallinen taipuman maksimi on huomioitu. Näiden tietojen perusteella valittiin palkin kulman arvoiksi tasaluvut asteen välein siten, että kaikki tarvittavat telakoot on huomioitu. Tällä periaatteella telojen halkaisijoiden vaihteluvälit mallissa tulevat olemaan taulukon 3.2.1 mukaiset.

Taulukko 3.2.1 *Telan halkaisijat mallissa*

Telan halkaisija (mm)
1200–1240
1241–1280
1281–1330
1331–1380
1381–1440
1441–1500
1501–1560
1561–1630
1631–1700
1701–1780
1781–1830

Mikäli palkki asennetaan radan suoralle osuudelle, ovat puolikkaat samalla tasolla eli kulma on 180°. Palkin puolikkaiden välisen kulman lisäksi telan halkaisija vaikuttaa palkin päätyjen tiivistykseen. Palkin päädyt tiivistävät levyt sekä suihkunsäätölevyjen profiili on muotoiltu aina joko telan halkaisijan mukaan tai suoraksi, mikäli palkin asennuspaikka ei ole telaa vasten. Lisäksi kostutusalueen tiivistävien kaavareiden korkeus riippuu telan halkaisijasta, sillä pienemmällä telan halkaisijalla kaavareiden tulee olla korkeammat, jotta ne voidaan säätää riittävän lähelle radan pintaa. Vaikka tässä yhteydessä puhutaan kaavareista, eivät kostuttimen kaavarit kuitenkaan ole kosketuksissa paperiradan pintaan, vaan ne ainoastaan pyrkivät estämään ylimääräisen ilman kulkemista kostutusalueen läpi.

3.2.3. Liityntöjen paikat

Palkin ilma-, vesi- ja sumunpoistoliitynnät sijaitsevat aina joko koneen käyttö- tai hoitopäässä. Liityntöjen paikka on voitava valita, sillä palkin epäsymmetrisestä rakenteesta johtuen palkkia ei voida pyöryttää toisin päin asennuspaikalla.

Vanhassa kostutinpalkin rakenteessa kaikki liitynnät ovat aina sijainneet keskenään samassa päädyssä, mutta uudistetun rakenteen myötä liitynnät voidaan myös sijoittaa eri päihin, mikäli halutaan. Ainoa liityntä, jonka paikkaa ei valita erikseen, on kaavareiden

liikutteluun käytettävien paineilmasylintereiden syöttöliityntöjen paikka. Nämä liitynnät sijaitsevat palkin rakenteesta johtuen aina samassa päädyssä vesiliityntöjen kanssa.

3.2.4. Muut parametrit

Kuten luvussa 3.1.1 mainittiin, on määriteltävä, kummasta päästä konetta suuttimien numerointi alkaa. Numerot merkataan laserilla runkolevyihin, joten numerot on saatava näkyviin DXF-kuviin.

Sumunpoiston toiminnan tehostamiseksi palkin poikkileikkaus on epäsymmetrinen, jotta sumunpoistokanaviin tiivistyvä vesi pääsee valumaan alaspäin myös silloin, kun palkki on asennettu lähestulkoon vaakatasoon. Tämän vuoksi palkkia ei voida asennettaessa pyöryttää tosisin päin, joten palkin määrittelyn yhteydessä on määrättävä palkin asennussuunta, jotta liitynnät saadaan sijoitettua kulloinkin oikeaan päähän palkkia.

Luvun 3.1.1 projektin alkumäärittelyihin kuuluva käyttöjännitteen määrittely koskee ainoastaan oheislaitteita, kuten vesi- ja ilmakekusta. Liikuttelulaitteiston käyttövoiman sijaan riippuu palkin painosta. Liikutuslaitteiston rakenne riippuu kuitenkin paljon myös asennuspaikasta ja joudutaan suunnittelemaan jokaisessa projektissa erikseen.

3.2.5. Yhteenveto

Kostutinpalkin määrittämiseen tarvittavat parametrit on esitetty taulukossa 3.2.2.

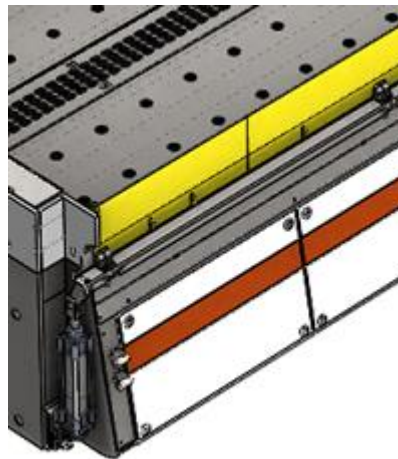
Taulukko 3.2.2: Yhteenveto kostutinpalkin parametreista

Parametri	Arvot (min – max)	
Rataleveys (mm)	1020,1050,1080...10500	
Telan halkaisija (mm)	1200...1830, suora	
Asennussuunta	Laskeva sivu vas.	Laskeva sivu oik.
Ilmaliityntöjen sijainti	Hoitopää	Käyttöpää
Vesiliityntöjen sijainti	Hoitopää	Käyttöpää
Sumunpoistoliitynnän sijainti	Hoitopää	Käyttöpää
Suuttimien numerointi	Hoitopää → Käyttöpää	Käyttöpää → Hoitopää

Kuten luvussa 3.2.1 todettiin, vaikuttaa rataleveys monen eri tekijän kautta kostutinpalkin poikkileikkauksen mittoihin. 4-rivisen kostutinpalkin kokonaisleveyden määrittää käytännössä suutinrivien välinen etäisyys sekä palkin reunalla olevien sumunpoistokanavien etäisyys reunimmaisista suutrinriveistä. Nämä mitat ovat erilaisten suutinkuvioiden testaamisen tuloksena saatuja mittoja. Mikäli suutrinrivejä tuodaan lähemmäksi toisiaan, häiritsevät paperiradan kulkusuunnassa ensimmäisten rivien suuttimet viimeisen rivin suuttimien toimintaa, eikä kosteusprofiilin säädettävyys ole riittävällä tasolla. Samoin käy, mikäli reunimmaisista sumunpoistokanavia tuodaan lähemmäksi suuttimia.

Kostutinpalkin korkeus määritellään käytännössä palkin taipuman mukaan. Myös palkin sisälle mahtuvien vesiletkujen määrä määrittää palkin korkeutta, mutta varsinkin

suurilla rataleveyksillä taipuman sallitut arvot määrittävät palkin korkeuden. Palkin poikkileikkauksen on oltava riittävän jäykkä, jotta taipuma pysyy sallituissa rajoissa myös silloin, kun rataleveys ja palkin pituus ovat suuria (luokkaa ~10 metriä). Tämä tarkoittaa myös sitä, että lyhyemmistä palkeista voitaisiin pienemmän taipuman ja vesiletkujen määrän vuoksi tehdä matalampia kuin pitkistä palkeista. Eri malleissa halutaan kuitenkin kustannussyistä käyttää samoja huoltoluukkuja, jotka ovat tyhjiömuovattua muovia, joten kaikista pituusvarianteista tehdään samankorkuisia. Lisäksi samojen luukkujen (kuva 3.2.3) on käytävä palkin molemmille puolille. Poikkileikkauksen mittojen ainoat muutokset tulevat täten olemaan telan halkaisijan vaihtelusta aiheutuvat muutokset palkin sivujen välisessä kulmassa.



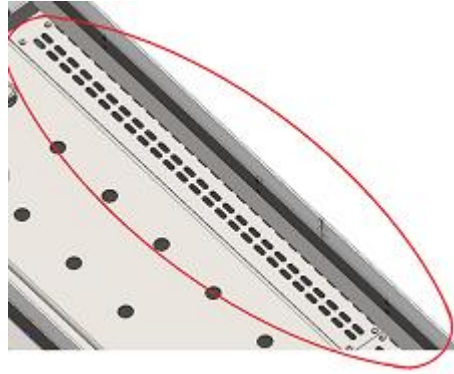
Kuva 3.2.3: Kostutinpalkin huoltoluukku

Taulukossa 3.2.2 esitetyt parametrit ovat myös toisistaan riippumattomia, joten ne sopivat palkin määrittämiseen myös siksi, ettei määrittelyn yhteydessä tarvita erillisiä interferenssitarkasteluita lähtöarvojen välille. Ainoastaan, mikäli palkki asennetaan radan suoralle osuudelle, jolloin palkin puolikkaiden välinen kulma on 180° , ei telan halkaisijan arvolla ole vaikutusta palkin rakenteeseen.

3.3. Suunnitteluprosessin muutokset

Kuten luvussa on 2.4 mainittu, on yhtenä suunnitteluautomaatiojärjestelmän kehittämisen haasteena se, kuinka suunnittelussa tehtäviä määrittelyjä joudutaan mahdollisesti muuttamaan, jotta automaattista suunnittelua voidaan soveltaa. Myös kostutinpalkissa muutamissa kohdin jouduttiin miettimään suunnittelumuuttujien määrittelyä hieman eri tavalla kuin mitä tähän asti oli toteutettu. Tässä luvussa mainitaan näistä pari tapausta esimerkin vuoksi.

Esimerkkinä toistuvien komponenttien suunnittelun muuttumisesta käy sumunpoistokanavien ritilälevyt, joiden tehtävänä on tasata imun tehoa koko palkin pituudella sekä estää suurten vierasesineiden yms. kulkeutuminen sumunpoistoputkistoa pitkin imupuhaltimelle. Ritilä on esitetty kuvassa 3.3.1.



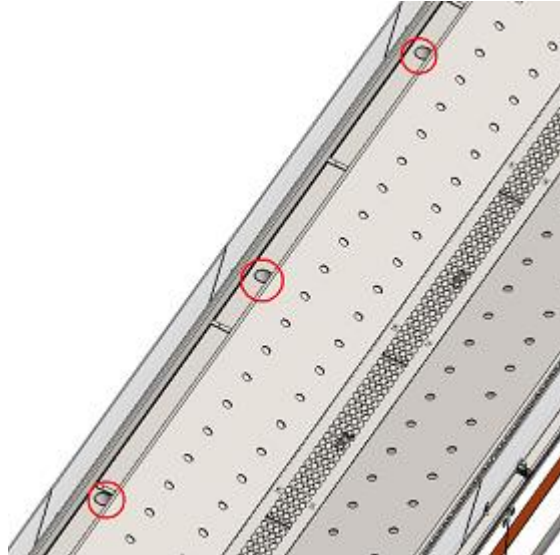
Kuva 3.3.1: Sumunpoiston ritilä

Aikaisemmassa palkkirakenteessa ritilöiden pituudet on valittu siten, että kaikki ritilät ovat keskenään samanpituisia (pituus noin metri) ja ritilässä näkyvät aukot on sovitettu kunkin ritilän pituudelle tasaisesti. Ritilöiden aukotusten koko ja pituusjako on pidetty aina samana. Ritilät on ruuvattu suoraan palkin kansilevyyn kiinni, joten niiden ei välttämättä ole tarvinnut kattaa koko kostuttimen pituutta.

Uudessa rakenteessa ritilät joudutaan suunnittelemaan siten, että päädyistä luettuna ensimmäiset ritilät ovat eripituisia kuin palkin keskellä olevat, koska palkin rakenteesta johtuen ensimmäinen ritilän kiinnityspiste ei voi olla aivan palkin päädyssä kiinni. Ritilät kiinnitetään osiin, joilla sumunpoistokanavan sivuseinä on tuettu runkolevyyn kiinni. Nämä osat on hitsattu paikoilleen ja niiden jako palkin pituussuunnassa määräytyy paljolti lujuusvaatimusten mukaan. Lujuusvaatimuksia ovat paitsi sumunpoiston sivuseinien tuennan tarve, myös kaavareiden saranoiden asennustiheyden tarve, sillä kaavareiden saranat tuetaan myös samoista kohdin.

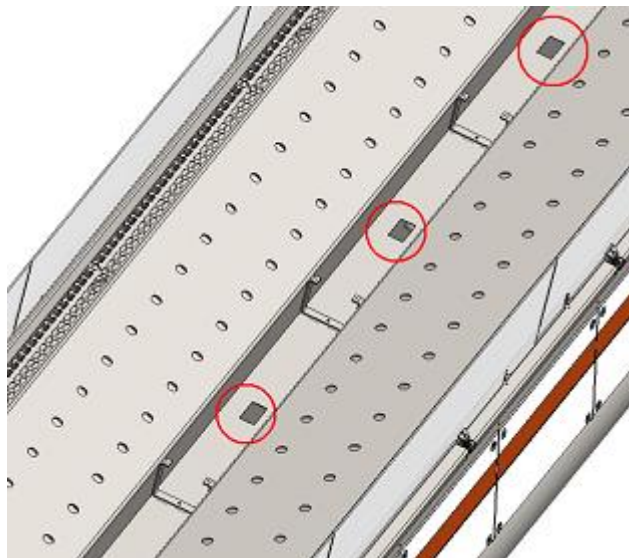
Suunnitteluautomaatissa vakiopituaisen ritilän pituudeksi tulee kahden kiinnityspisteen välinen etäisyys. Seuraavaksi lasketaan päädyistä katsottuna ensimmäisten levyjen pituudet, jotka saadaan lisäämällä vakiopituaisen levyn pituuteen etäisyys palkin päädyistä ensimmäiseen kiinnityspisteeseen. Kuten aikaisemmin, aukotuksille levyissä on määritetty ihanteellinen koko sekä jako pituussuunnassa. Aukotusten määrä yhdessä levyssä määritellään lopuksi jakamalla yhden levyn aukotuksille käytettävissä oleva pituus niin, että aukotukset tulevat levyn pituudelle siten, että niiden etäisyys levyn molemmista päistä on keskenään sama. Lopuksi lasketaan vielä palkin pituudesta kuinka monta ritilälevyä tarvitaan sekä missä kohtaa origosta katsottuna ensimmäiset levyt sijaitsevat.

Toinen esimerkki suunnittelun muuttumisesta liittyy sumunpoistokanavan letkukarojen (kuvassa 3.3.2, merkitty punaisella) määrän sekä sumunpoistokanavan virtausta säätelevien aukkojen (kuvassa 3.3.3, merkitty punaisella) koon laskentaan. Aikaisemmin suunnittelija on valinnut käytettävän sumunpoiston kokoajaputken koon ja mitoittanut sen jälkeen Excel-taulukon tarvittavien letkukarojen määrän sekä sopivasti kokeilemalla tarvittavien virtauksenrajoitusaukkojen koon ja määrän siten, että letkukarojen ja virtauksenrajoitusaukkojen pinta-ala vastaa sumunpoistoputken pinta-alaa.



Kuva 3.3.2: Sumunpoiston letkukarat

Koska tässä parametrisessa mallissa ei voida määrittää mitään iteroimalla tai sopivasti kokeilemalla, täytyy määrittelyä hieman muuttaa. Aluksi lasketaan tarvittava sumunpoiston kokonaispinta-ala ratalevyden (eli suutinten määrän) mukaan. Tämän jälkeen lasketaan, kuinka monta letkukaraa per sivu täytyisi olla, jotta ennalta määrätyn kokoisilla letkukaroilla saavutettaisiin riittävä pinta-ala. Koska letkukarojen määräksi saadaan harvemmin kokonaisluku (vaan esimerkiksi 6,74), määritellään lisäksi, kuinka paljon letkukaroilla saavutettava pinta-ala saa jäädä ihanteellisen arvon alapuolelle, jotta tiedetään, pyöristetäänkö letkukarojen määrä ylös- vai alaspäin. Tämän jälkeen lasketaan letkukarojen väli niin, että letkukarat asennetaan tasavälein.



Kuva 3.3.3: Sumunpoiston virtauksenrajoitusaukot

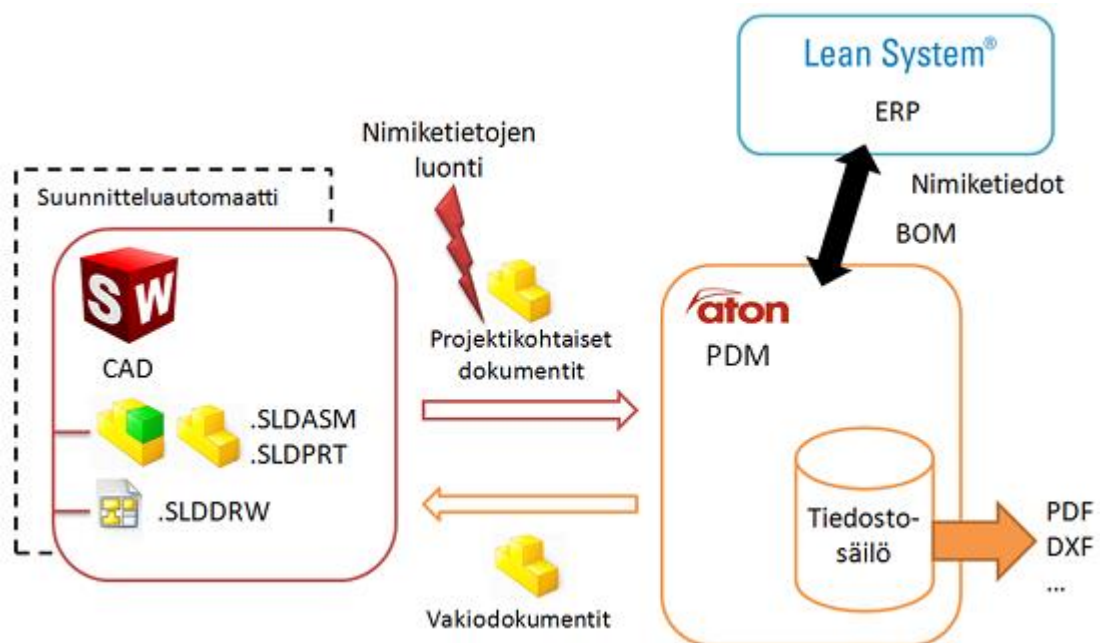
Virtauksenrajoitusaukkojen lukumäärä puolestaan määritetään niin, että aukot tulevat aina sumunpoiston ritilöitä tukevien kiinnikkeiden väliin, jotta aukot eivät peittyisi tukien alle. Tämän jälkeen määritetään yhden aukon leveys, joka pysyy aina samana palkin pituudesta riippumatta. Lopuksi lasketaan sumunpoiston kokonaispinta-alan mu-

kaan aukkojen vaadittava korkeus. Kuten nähdään, on muuttujien määrittelyjärjestyksen oltava toisinaan hieman erilainen, kun verrataan ihmisen tekemää suunnittelutyötä, sekä automaattisesti suoritettavaa parametrien määrittelyä. Yleisesti voidaan todeta, että määrittelyjä on muutettava siihen suuntaan, että ihmisälyä voidaan korvata mekaanisella työllä ja laskutoimituksilla, joita tietokoneella voidaan laskea.

3.4. Mallin toiminnan määrittely: ohjelmistot

Aikaisemmissa projekteissa kustutinpalkit on mallinnettu CATIA V5-ohjelmistolla ja mallit sekä valmistuspiirustukset on säilötty verkkolevyille. Piirustusten dokumenttinumerojen hallinta on tapahtunut manuaalisesti. Uudet kustutinpalkit tullaan mallintamaan SolidWorks-ohjelmistolla, minkä lisäksi mallit sekä valmistusdokumentit tallennetaan Aton PDM-järjestelmään. SolidWorks:ssä on käytössä SolidPDM-lisäosa, jolla voidaan hallita SolidWorks-dokumentteja Aton-järjestelmässä. Toiminnanohjausjärjestelmänä on käytössä Lean, joka on yhteydessä Aton-järjestelmään. Mikäli 3D-malleja tarvitsee siirtää eri ohjelmistojen välillä, voidaan palkkien mallit tallentaa SolidWorksilä esimerkiksi STEP-muotoon.

Suunnittelumallin kehittämistä varten on mallin käyttöä projektitoiminnassa havainnollistettu kuvassa 3.4.1. Tässä luvussa puhuttaessa suunnittelumallista tarkoitetaan SolidWorks-mallia sekä siihen liittyvää lisäosaa tai ominaisuutta, jolla suunnittelun automatisointi saadaan toteutettua.



Kuva 3.4.1: Suunnitteluautomaatin käyttö projektitoiminnassa

Suunnittelumallin avulla luodaan projektikohtaisesti varioituvat dokumentit, joihin kuuluvat kaikkien tasojen kokoonpanot, muuttuvat komponentit sekä valmistuspiirustukset. Kustutinpalkin rakenne koostuu projektikohtaisesti muuttuvista komponenteista sekä vakiokomponenteista (esimerkiksi suuttimet, tyhjiömuovatus huoltoluukut, kiinnitystarvikkeet jne.). Projektikohtaisten dokumenttien nimiketiedot voidaan luoda siinä

vaiheessa, kun dokumentit siirretään PDM-järjestelmään, tai mikäli suunnittelumalli sen mahdollistaa, voidaan nimikkeet luoda myös automaattisesti uutta varianttia tehtäessä.

Kun SolidWorks-suunnittelumallilla tuotetut dokumentit on siirretty PDM-järjestelmään ja hyväksytty, luo PDM-järjestelmä osavalmistuksessa tarvittavat osaluettelot, muuntaa työpiirustukset PDF-muotoon sekä luo DXF-tiedostot ohutlevyosien levityskuvista laser- ja vesileikkausta varten. PDM-järjestelmässä linkataan tässä vaiheessa kustutinpalkin projektikokoonpanon ylin taso ERP-järjestelmään, jolloin osaluettelot ja nimikkeiden tiedot siirtyvät eteenpäin hankintaa varten.

3.5. Toteutusvaihtoehdot suunnittelumallille

SolidWorks-suunnitteluautomaation toteuttamiseksi on olemassa erilaisia vaihtoehtoja, kuten kaupallisesti saatavissa olevat ohjelmistot, itse tehdyt ohjelmistot, sekä ohjelmiston ominaisuuksia hyödyntävät lisäosat. Kaupallisesti saatavissa olevat suunnitteluautomaatio-ohjelmistot ovat pääasiassa järjestelmiä, joissa luodaan muunneltavia mittoja koskeva suunnittelusäännöstö, minkä jälkeen osat ja kokoonpanot generoidaan suunnittelusäännösten perusteella. Tällaisia ohjelmistoja ovat esimerkiksi DriveWorks ja TactonWorks. Toisentyypisiä ohjelmia edustaa esimerkiksi AutomateWorks, jossa SolidWorks-mallia ohjataan Excel-rajapinnan kautta suorittamalla lista määrättyjä toimintoja (esimerkiksi mitan muuttaminen, osan konfiguraation vaihtaminen jne.).

Kaupallisesti saatavien ohjelmistojen vaihtoehtona on tehdä suunnitteluautomaatti itse esimerkiksi SolidWorksin API-rajapintaa tai Excel-taulukoita käyttävää Design Table-ominaisuutta hyödyntäen. Tässä luvussa esitellään pääpiirteittäin muutamia yleisimpiä vaihtoehtoja suunnitteluautomaatin toteuttamiselle sekä pohditaan parasta vaihtoehtoa tämän työn mukaisessa toteutusympäristössä.

3.5.1. DriveWorks

DriveWorks on SolidWorks:lle tehty suunnittelun automatisointityökalu, jonka kevyt-versio DriveWorks Express – joka sisältää muutamia DriveWorksin perusominaisuuksia – toimitetaan SolidWorks-ohjelmistoihin sisäänrakennettuna. Tarvittavien lisäominaisuuksien mukaan ohjelmistosta on myös saatavilla versiot Solo ja Pro, jotka ovat paremmin soveltuvia suurien kokoonpanojen suunnittelutehtävien automatisoimiseen sekä sisältävät monipuolisemmin ominaisuuksia esimerkiksi piirustusten luomiseen liittyen. (DriveWorks)

DriveWorks:ssa luodaan suunnittelusäännöstö, jonka pohjalta malli sekä piirustukset muokataan käyttäjän syöttämien lähtöarvojen mukaiseksi. Ohjattavissa olevien ominaisuuksien kirjo on varsin laaja, etenkin laajimmassa Pro-versiossa. Lisäksi Pro-versiossa on mahdollista tehdä esimerkiksi web-sivustolla toimiva konfiguraattori sekä automatisoida dokumenttien vieminen PDM-järjestelmään, mikäli käytössä on SolidWorks:n Enterprise PDM-tuotetiedonhallintajärjestelmä. (DriveWorks)

Suunnittelusääntöjen luomisessa voidaan käyttää samoja funktiota sekä syntaksia kuin Excel-funktioissa, joten Excel-käyttäjille syntaksi on tuttu jo entuudestaan. Solid-

Worksiin sisältyvää Express-versiota lukuun ottamatta muut DriveWorks:n versiot vaativat SolidWorks:n tapaan erillisen vuosittaisen lisenssin. Lisenssit voivat olla joko käyttäjäkohtaisesti nimettyjä (kiinteitä) tai kelluvia lisenssejä, jotka varataan käytön ajaksi lisenssipalvelimelta. (DriveWorks)

3.5.2. AutomateWorks

AutomateWorks on SolidWorksiin saatavilla oleva lisäosa, joka hyödyntää mallien muokkaamisessa Excel-taulukoita. Excel-taulukon toiselle välilehdelle luodaan käyttöliittymä, jonka kautta annetaan lähtöarvot mallien muokkaamista varten. Toiselle välilehdelle lisätään mallia ohjaavat funktiot ohjatun toiminnon avulla. AutomateWorks:lla voi ohjata esimerkiksi mallien mittoja, kokoonpanon komponenttien konfiguraatioita tai komponenttien näkyvyyttä. (AutomateWorks)

Excel-pohjaisuuden johdosta myösään AutomateWorks:n käyttäminen ei vaadi erityistä ohjelmointiosaamista. DriveWorks:n tavoin myös AutomateWorks on erillisellä lisenssillä toimiva ohjelmisto. (AutomateWorks)

3.5.3. Makrot ja API-rajapinta

SolidWorks:n API:n (*Application Programming Interface*) kautta voidaan ohjata SolidWorks:a makrojen avulla. Makrojen ohjelmoinnissa voidaan käyttää Microsoftin Visual Studio-ympäristön ohjelmointikieliä, kuten Visual Basic, Visual C#, Visual C++ 6.0 ja Visual C++/CLI. Makrojen ohjelmointi ei vaadi erillistä ohjelmistoa, vaan SolidWorks sisältää makrojen ohjelmointiin tarvittavan työkalun. Lisäksi ohjelmassa voidaan nauhoittaa makroja, joita voidaan liittää osaksi muita makroja. (SolidWorks API Help)

Makrojen avulla toteutettavissa olevat toiminnot riippuvat lähestulkoon yksinomaan ohjelman tekijän ohjelmointitaidoista. Vastaavasti makrojen ohjelmointiin tarvittavien ohjelmointikielten osaaminen ei ole läheskään yhtä laajaa, mikäli verrataan Excelin peruskäyttöön.

3.5.4. Design Table-ominaisuus

SolidWorks:ssä on sisäänrakennettuna Microsoft Excelin kevytversio, jonka avulla voidaan hallita mallien versioita (joita kutsutaan SolidWorks:ssa *konfiguraatioiksi*). Tätä ominaisuutta voidaan hyödyntää esimerkiksi tekemällä kiinnittimistä yms. vakio-osista konfiguraatioiden avulla muokattavat mallit, jolloin esimerkiksi ruuvien pituutta vaihdettaessa ei kokoonpanoon tarvitse hakea ja paikoittaa uutta osaa, vaan konfiguraation vaihtaminen riittää. Design Table:n avulla konfiguraatioiden hallinta on helpompaa etenkin silloin, kun konfiguraatioissa muokattavien ominaisuuksien määrät ovat suuria. Mikäli ylin kokoonpano tehdään kokonaan konfiguraatioiden avulla hallittavaksi, tarkoittaa se sitä, että jokaisesta alikokoonpanosta ja kokoonpanosta on tehtävä omat konfiguraationsa jokaiselle parametriyhdistelmälle. (SolidWorks Help)

Koska Design Table-taulukko käyttäytyy kuten normaali Excel-taulukko, voidaan Design Table:a hyödyntää myös suunnitteluautomaatin tekemiseen ilman, että osista tai kokoonpanoista tehdään useita erilaisia konfiguraatioita. Tämä onnistuu esimerkiksi mallintamalla kokoonpanot ja osat top-down-menetelmällä Skeleton-mallien avulla. Skeleton-mallin geometriaa ohjataan Design Table:n avulla, jolloin myös kaikki kokoonpanon mallit muokkautuvat Excel-taulukon mukaisesti.

Design Table:n kautta muokattavien ominaisuuksien määrä on suppeampi verrattuna esimerkiksi makroiin. Esimerkiksi ylimmältä kokoonpanotasolta ei voida muokata alikokoonpanojen yksittäisten osien piirteitä. Tällöin on esimerkiksi tehtävä pääkokoonpanoon globaali muuttuja, jota ohjataan Design Table:lla ja osiin, joita halutaan muokata, tehdään yhtälöt osatasolle, jotka taas kytketään pääkokoonpanon muuttujiin. Lisäksi mahdollisuudet piirustusten ohjaamiseen ovat suppeammat, jolloin vaihtoehtoina on laatia piirustukset niin, ettei mittoja tarvitse lisäillä mallin muuttuessa, tai esimerkiksi tehdä makrot piirustusten päivittämiseen.

3.5.5. Yhteenveto toteutustavoista – toteutustavan valinta

Pohjana suunnittelumallin toteutustavan valinnalle on kuvassa 3.4.1 esitetty periaate- tasoinen kuvaus eri tietoteknisten järjestelmien toiminnasta suunnitteluprosessin aikana sekä tiedot eri parametreista ja niiden vaihteluväleistä. Vaikka kirjallista suunnittelutietoa kustutinpalkista on olemassa melko vähän, on suunnittelutieto kuitenkin sellaista, että sen pohjalta voidaan laatia suunnittelumallia ohjaavia sääntöjä. Lisäksi valittavalla toteutustavalla on pystyttävä toteuttamaan 3D-mallien sekä valmistuspiirustusten laadinta siten, että luvussa 3.1.2 mainitut tavoitteet projektikohtaisten suunnittelutuntien säästymisen osalta saavutetaan. Mallin toteutustavan valinnalle asetettiin seuraavanlaisia vaatimuksia (V) ja toiveita (T):

- CAD-mallien ja valmistuspiirustusten automatisointi (V)
- toimivuus nykyisessä PDM-ympäristössä (V)
- edulliset hankintakustannukset (V)
- helppokäyttöisyys (T)
- helppo ylläpitää (V)

Yllä olevien vaatimusten pohjalta voidaan hyvin nopeasti todeta, että edullisen hankintahinnan mukaan suurimman osan kaupallisista järjestelmistä voi sulkea valinnan ulkopuolelle, kun otetaan huomioon, että vuosittain suunniteltavien kustutinpalkkien määrä on kuitenkin melko alhainen. Mikäli kuitenkin projektikohtaisen räätälöinnin automatisointi havaitaan niin hyväksi toimintatavaksi, että sitä halutaan laajentaa koskemaan myös muita tuotteita, kannattaa joustavan kaupallisesti saatavan järjestelmän hankintaa mahdollisesti harkita uudelleen.

Makrojen hyödyntämistä puoltaisi se, että niiden avulla olisi mahdollista toteuttaa helppokäyttöinen ja hyvin räätälöity suunnittelumalli, mikäli ohjelmointiosaamista löy-

tyy. Tässä tapauksessa ohjelmointiosaaminen on työn kirjoittajan kohdalla kuitenkin tarvittavien ohjelmointikielien osalta lähes olematonta, minkä lisäksi järjestelmän ylläpito ja muokkaaminen vaatisi myös jatkossa hyvää ohjelmointiosaamista. Lisäksi SolidWorks:n käytössä Aton PDM-järjestelmän yhteydessä on havaittu, että tällöin makrojen käyttäminen (esimerkiksi web-komponenttikirjastoista haetut swb-tiedostojen kautta ajettavat komponentit) aiheuttaa toisinaan SolidWorks:n kaatumisen.

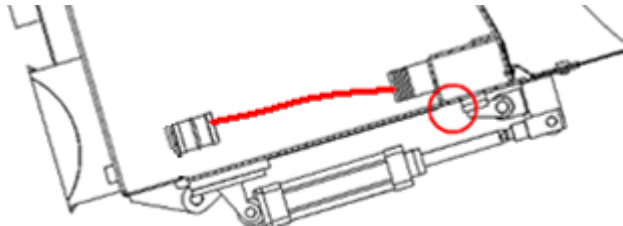
Lopuksi malli päätettiin toteuttaa Design Table-ominaisuutta hyödyntäen, ilman erillisiä ohjelmistoja. Tämän vaihtoehdon hyvinä puolina ovat alhaiset kustannukset sekä se, että mikäli Excel-taulukon sisältämät muuttujat ja niiden väliset yhteyden dokumentoidaan riittävän hyvin, voi mallia periaatteessa muokata kuka tahansa, joka osaa käyttää SolidWorks:ia sekä Exceliä. Verrattaessa esimerkiksi DriveWorks tai AutomateWorks-ohjelmistoihin ei pelkällä Design Table:n käytöllä saavuteta samanlaisia automatisoimismahdollisuuksia piirustusten osalta, mutta mikäli piirustukset tehdään huolellisesti, on aikaisemmin mainittujen tavoitteiden saavuttaminen suunnittelutuntien vähentämisen osalta täysin realistista. Design Table-ominaisuutta on tähän asti käytetty Aton-järjestelmän yhteydessä mallien konfiguraatioiden (esim. ostokomponenttien, kuten ruuvien eri versiot) luomiseen, joten mallin toiminnalle Aton-ympäristössä on paremmat edellytykset kuin esimerkiksi makroilla automatisoidulla mallilla. Makrojen käytön yhteydessä on ilmennyt toisinaan ongelmia Atonin SolidPDM-linkin kanssa. Toisinaan SolidWorks saattaa kaatua makroja käynnistettäessä silloin, kun SolidPDM-lisäosa on päällä, tai ohjelma ei suostu suorittamaan makroja ennen uudelleenkäynnistystä. Design Table:n käytön riskinä on kuitenkin SolidWorks:n ja Excelin välinen yhteensopivuus tulevaisuudessa. Mikäli jostain syystä esimerkiksi muutaman vuoden päästä SolidWorks päättäisi poistaa Excel-tuen ohjelmistostaan, tulisi mallista täysin hyödytön. Excel-rajapintaa hyödyntäviä lisäosia on kuitenkin olemassa useita, minkä lisäksi Design Table-ominaisuus on ollut SolidWorks:ssa jo useita vuosia, joten riski Excel-tuen loppumiselle voidaan arvioida melko pieneksi. Mallin toteutus esitellään tarkemmin luvussa 4.

3.6. Rakenteen suunnitteluratkaisuiden vaikutukset

Kuten luvussa 2.3.3 todettiin, on parametrien valinnalla ja niiden keskinäisillä riippuvuussuhteilla suuri merkitys siihen, kuinka parametrisen mallin rakentaminen kyseisestä tuotteesta ja mallista onnistuu. Tuotteen suunnitteluratkaisuilla voidaan vaikuttaa sekä siihen, millaisia parametreja geometrian määrittämiseksi tarvitaan että siihen, millaisia riippuvuuksia ja rajoitteita eri parametrien välillä esiintyy. Mikäli teknisten ratkaisuiden välillä on voimakasta interferenssiä, eli tietyillä parametrien arvoilla joidenkin ratkaisuiden käypä joukko pienenee, tulee mallista välittömästi monimutkaisempi riippuvuuksien välisten interferenssitarkasteluiden vuoksi.

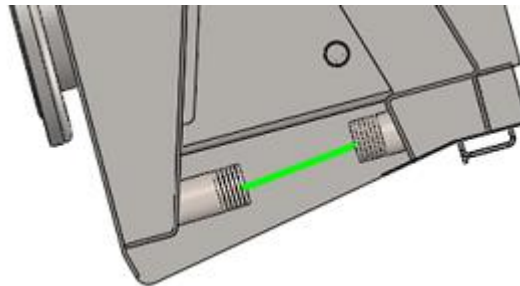
Esimerkkinä siitä, kuinka parametrisoitavien piirteiden määrää voidaan vähentää, käy kostutinpalkin sumunpoistokanavan muotoilu. Edellisissä kostutinpalkin versioissa sumunpoistokanava on sijainnut suoraan imukammion yläpuolella ja sumunpoistokanavaan tiivistynyt vesi on johdettu letkuja pitkin imukammioon. Letkukaroista alempi on

sijainnut ylempään verrattuna hieman lähempänä palkin keskilinjaa, joten sumunpoistokanavasta lähtevä letku on tehnyt pienen mutkan sisäänpäin, kuten punainen viiva kuvassa 3.6.1 osoittaa. Tästä on seurannut, että mikäli palkki joudutaan asentamaan sellaiseen asentoon, jossa suuttimet ovat lähes vaakatasossa, alkaa vettä kertyä sumunpoistokanavan pohjaan. Tällöin veden poistamisen tehostamiseksi saatetaan sumunpoistokanavan pohjaan joutua tekemään erilliset viemärointiliitynnät (kuva 3.6.1, punaisella rengastettu kohta), jotta vesi ei pääsisi tulvimaan sumunpoistokanavasta paperiradalle. Tällöin viemärointiliityntöjen sijainti ja tarve riippuu palkin asennuskulmasta sekä liityntöjen määrä palkin pituudesta eli rataleveyyden arvosta.



Kuva 3.6.1: Viemärointiliitynnän paikka vanhassa kostutinpalkissa

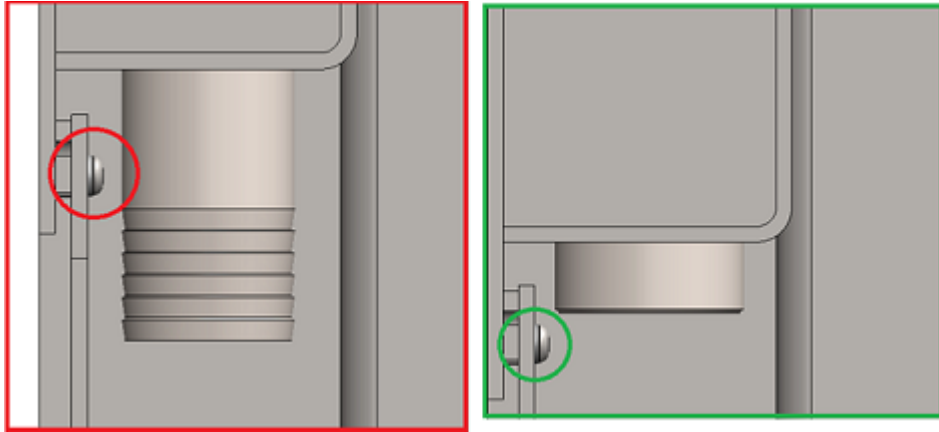
Siirtämällä alemmaa letkukaraa kauemmaksi palkin keskilinjalta pääsee kanavasta poistuva vesi virtaamaan alaspäin myös silloin, kun palkki on asennettu lähestulkoon vaaka-asentoon, kuten vihreä viiva kuvassa 3.6.2 osoittaa.



Kuva 3.6.2: Rakenteen muutos veden virtauksen kannalta

Tällöin rakenteesta tulee epäsymmetrinen, jolloin on voitava määrittää, miten päin palkki tullaan asentamaan radan kulkusuuntaan nähden. Vastaavasti viemärointiliityntöjen paikan määrittämiseen tarvittavat muuttujat ja piirteet jäävät pois, kuten tarvitaanko liityntöjä, kummalla puolella palkkia liitynnät ovat, montako liityntää tarvitaan ja mikä on niiden jako palkin pituussuunnassa.

Toinen esimerkki interferenssin poistamisesta suunnitteluratkaisuiden avulla liittyy sumunpoistokanavan pohjassa sijaitsevaan letkukaraan. Mikäli letkukara hitsataan suoraan sumunpoistokanavan pohjaan – kuten tähänkin asti on tehty – tulee mallinnettaessa varmistaa, että sumunpoistokanavaan hitsattavat letkukarat tulevat aina sellaiseen kohtaan, jossa ne eivät peitä huoltoluukun kannakkeen kiinnitysruuvien kohtaa (katso kuva 3.6.3, punaisella kehystetty kuva). Mikäli näin käy, ei huoltoluukun kannakkeen ja letkukaran väliin jää riittävästi tilaa, jotta kannake voitaisiin ruuvata sisäpuolelta paikoilleen.



Kuva 3.6.3: Letkukaran kiinnityksen vaikutus

Korvaamalla letkukara matalalla hitsattavalla muhvilla (kuva 3.6.3, vihreällä kehystetty kuva) saadaan muhvin alapuolelle jäämään riittävästi tilaa, jotta huoltoluukun kannake voidaan asentaa riippumatta siitä, missä kohtaa muhvi sijaitsee. Tällöin käytetään letkukaraa, joka voidaan ruuvata muhviin kiinni sen jälkeen, kun huoltoluukkujen kannakkeet on asennettu paikoilleen.

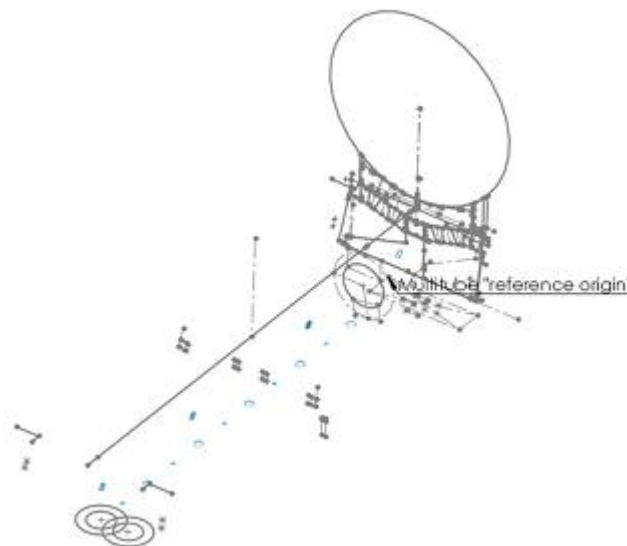
4. SUUNNITTELUMALLIN RAKENTAMINEN

Kostutinpalkin suunnittelumalli toteutettiin hyödyntämällä SolidWorksin Design Table-ominaisuutta. Tässä luvussa esitellään suunnittelumallin kehittämisen vaiheet, kuvataan suunnittelumallin käyttöä suunnitteluympäristössä sekä tutkitaan, millaisia muutoksia nykyiseen toimintaan parametrisesti ohjautuvan suunnittelumallin käyttö aiheuttaa.

4.1. Mallin rakenne

Kostutinpalkin suunnittelumallin keskeisimmät elementit ovat kaikkien komponenttien geometrian määrittävä skeleton-malli sekä skeleton-mallin geometriaa ohjaava Design Table-Excel-taulukko, joka toimii samalla suunnittelumallin käyttöliittymänä. Skeleton-malleissa skeleton (”luuranko”) sisältää mallin layout-tiedon, eli tiedon osien sijainnista mallin ympäristössä. Tällaisesta mallinnuksesta käytetään myös nimitystä *top-down*-mallinnus. (Chen et al 2012, s. 1036–1037)

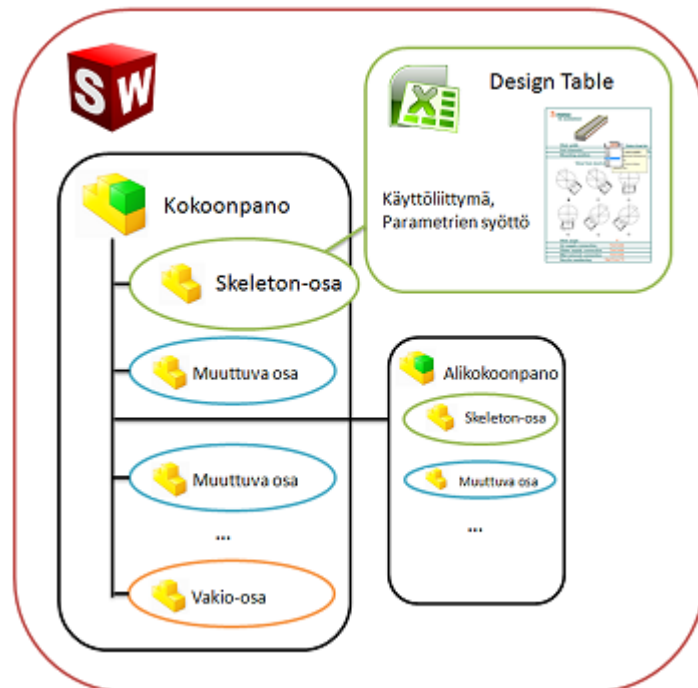
Skeleton-mallinnuksessa kaikkien mallien geometria määritetään yhteisestä ”luurangosta” (kuvassa 4.1.1), jolloin komponenttien piirteiden määrittävän geometrian lisäksi määritetään myös komponenttien sijainnit koordinaatistossa. Perusajatuksena on, että kaikkien kokoonpanon mallien origot sijaitsevat samassa pisteessä, eikä kokoonpanojen kasaamiseen käytetä erillisiä paikoitusehtoja esimerkiksi mallien pintojen suhteen.



Kuva 4.1.1: Skeleton-luurankomalli

Suunnitteluautomaatin toimintaperiaatetta ja rakennetta on hahmotettu kuvassa 4.1.2. Skeleton-malli sijoitetaan omaan komponenttiinsa (SolidWorks:ssa Part-tiedosto), jol-

loin kyseistä, kaikkien osien geometriat sisältävää komponenttia voidaan käyttää myös kaikissa alikokoonpanoissa. Tällä tavoin pyritään välttämään useiden kokoonpanotasojen yli vaikuttavia riippuvuuksia ja täten saamaan mallista helpommin hallittavaa. Lisäksi skeleton-geometrian sijoittaminen erilliseen tiedostoon tuo etua siinä, ettei geometriaa määrittäviä sketchejä muokataksaan tarvitse välttämättä avata pääkokoonpanoa, jonka avaaminen tai muokkaaminen on usein suuresta tiedostokoosta johtuen melko hidasta. Etuna on myös se, että eri alikokoonpanot voivat tällöin olla auki samanaikaisesti eri suunnittelijoilla, koska pääkokoonpanoa ei tarvitse avata yksittäisen alikokoonpanon tai jonkin sen osan muokkaamiseksi.



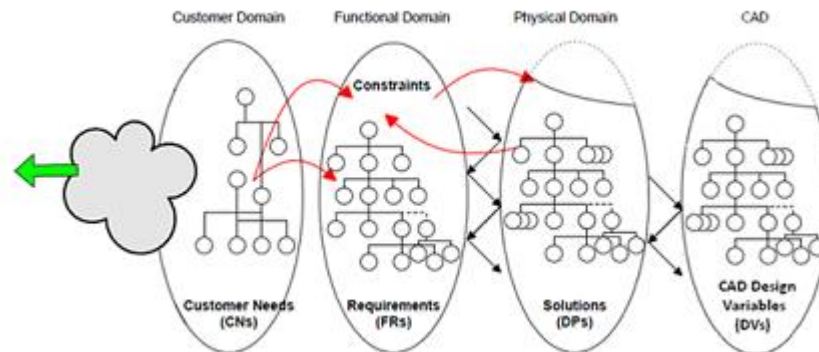
Kuva 4.1.2: Suunnitteluautomaatin toiminta ja rakenne

Parametrien muokkaaminen tapahtuu Design Table-taulukossa olevan käyttöliittymän kautta. Taulukko kuuluu skeleton-osaan, eikä kokoonpano sisällä useampia taulukoita, vaan kaikki mallin muokkaamiseen tarvittavat toiminnot tapahtuvat skeleton-osan taulukon kautta. Koska samaa skeleton-osaa käytetään alikokoonpanoissa, ei ole väliä, millä kokoonpanotasolla taulukon muokkaus tehdään, sillä saman taulukon muokkaaminen vaikuttaa saman rakenteen kaikkiin komponentteihin.

4.1.1. Parametrit ja niiden järjestys

Kuten taulukossa 3.2.2 on esitetty, voidaan kustutinpalkki määritellä seitsemän parametrin avulla. Näiden parametrien lisäksi mallissa on sellaisia parametreja, joiden arvot johdetaan syötetyistä parametreista erilaisien riippuvuuksien mukaan, mutta niitä ei välttämättä voida säätää. Lisäksi parametrit voivat olla myös kiinteitä parametreja, joilla on kuitenkin mahdollista muokata palkin geometriaa, mikäli sille ilmenee tulevaisuudessa tarvetta. Luvun 2.3 kuvassa 2.3.1 esitettiin tuotteen rakennetta eri näkökulmista. Tätä näkemystä voidaan tässä yhteydessä hieman laajentaa siten, että asiakastarpeiden

(joista palkin määrittelyssä tarvittavat parametrit on johdettu) kautta voidaan johtaa tuotteen teknisten ratkaisuiden ohella myös CAD-käytössä tarvittavat CAD-järjestelmän muuttujat, kuten on esitetty kuvassa 4.1.3. On huomattava, että CAD-muuttujien määrä ja laatu riippuvat myös käytettävästä CAD-järjestelmästä.



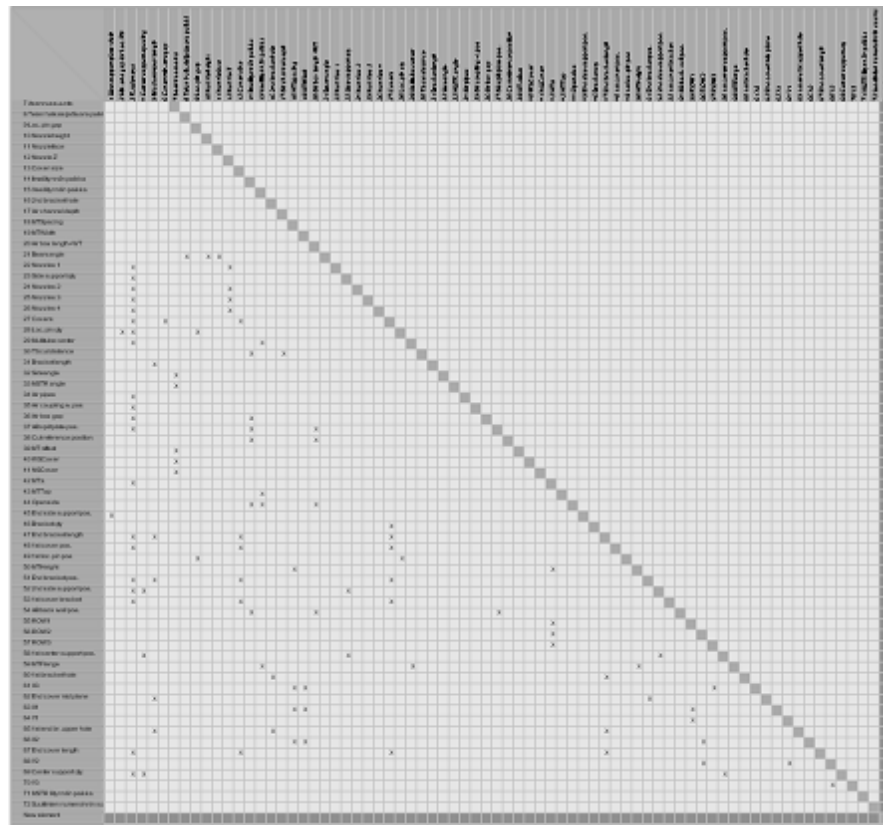
Kuva 4.1.3: CAD-järjestelmän muuttujat

Palkin osien pituussuuntaisia mittoja määrittäviä parametreja määrittäessä on syytä pitää mielessä, että suuttimen toiminnasta johtuen (selostettu tarkemmin luvussa 3.2.1) palkin pituuden muutos kahden variantin välillä on aina 30mm. Tämän vuoksi on edullista ja järkevää sitoa useimmat pituussuuntaiset parametrit siten, että niiden vaihteluväli on mahdollista tehdä jaolliseksi 30 mm:llä.

Malliin syötettävien parametrien mukaan muuttuvien parametrien joukossa on oltava – kuten myöhemmin luvussa 4.1.4 tarkemmin esitetään – varsinaisten geometriaa ohjaavien parametrien lisäksi myös sellaisia apuparametreja, joita tullaan hyödyntämään esimerkiksi piirustuksia tehtäessä. Tällä tavoin saadaan esimerkiksi runkolevyn suutinreikien lukumäärä piirustuksissa ohjautumaan mallin mukaan kytkemällä kyseisten reikien lukumäärää ilmaiseva parametri piirustuksen tekstikenttään.

Yksi parametrisesti ohjautuvan mallin suunnittelun tärkeimpiä vaiheita on määrittely, missä järjestyksessä parametrit sekä geometriaa ohjaavat piirteet on määritettävä, jotta malli toimisi oikein. Mikäli järjestys ei ole oikea, saattaa parametrien muuttaminen aiheuttaa epäkelvollisen geometrian tai vaatia, että malli päivitetään useampaan kertaan, jotta kaikkia piirteitä ohjaavien yhtälöiden arvot iteroituvat oikein.

Luvussa 2.4 esitettiin, että parametrien välisten riippuvuuksien ja optimaalisen määrittelyjärjestyksen selvittämiseen voidaan hyödyntää DSM-matriisityökalua. Tutkitaan myös kostutinpalkin mallin parametrien mahdollista järjestystä DSM-työkalun avulla. Laajennetaan DSM-matriisin käyttöä siten, että otetaan tarkastelun kohteeksi kaikki CAD-mallin geometriaan syötettävät parametrit ja muuttujat, jotka vaikuttavat mallin geometriaan. Tämä tarkoittaa siis, että apuparametreja, kuten työpiirustuksissa näkyvä runkolevyn suutinreikien määrä, ei kirjata DSM-työkaluun. Muuten tarkasteltavien parametrien joukko sisältää kaikki Design Table-taulukosta malliin siirrettävät parametrit ja muuttujat, sekä niiden määrittelemiseksi tarvittavat apumuuttujat, jotka helpottavat mallin muokkaamista. Yhteensä tarkastelujoukko sisälsi 250 parametria, muuttujaa ja apumuuttujaa, joista osa on esitetty kuvan 4.1.4 matriisissa.



Kuva 4.1.4: Parametrien järjestys

Vaikka kuva 4.1.4 esittää vain osaa mallin parametreista, huomataan, että kaikki riippuvuudet ovat diagonaalin alapuolella, joten mallin sisäisiä iterointeja ei tarvita. Mikäli iterointia vaativia riippuvuuksia syntyy, joudutaan miettimään uudestaan mallin toteutusmenetelmää, jotta saadaan käyttöön sellaisia laskennallisia työkaluja, joiden avulla tällaisia riippuvuuksia sisältävien interferenssien tarkastelu ja ratkaiseminen on mahdollista.

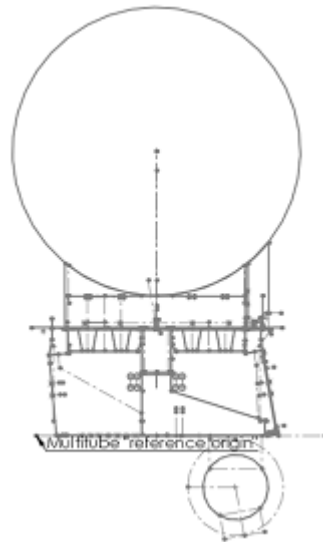
Silloin, kun kehitetään monimutkaisia ja suuria parametrisia malleja, uusia ohjattavia piirteitä lisättäessä on varmasti hyvä ratkaisu kirjata uusia muuttujia ja niiden riippuvuuksia DSM-matriisityökaluun, jotta varmistutaan, että malli pysyy määriteltynä oikeassa järjestyksessä. Huomionarvoista on kuitenkin se, että mikäli DSM-matriisityökalun käyttöä laajennetaan käsittämään myös muita, kuin pelkästään tuotteen määrittelyvaiheessa tarvittavia parametreja, vaikuttaa mallin toteutustapa muuttujien määrään sekä niiden sisältöön ja riippuvuuksiin. Tämän vuoksi matriisin käytön tarkoituksena on lähinnä varmistaa, ettei toteutettu malli sisällä sellaisia riippuvuuksia, jotka saattaisivat joillain parametriyhdistelmillä aiheuttaa esimerkiksi mallin kaatumisen.

4.1.2. Skeleton-mallin geometria

Skeleton-mallin geometria koostuu eri tasoille piirretyistä 2D-sketcheistä, joilla määritellään yksittäisten osien poikkileikkauksen geometria, sekä tasoista, joilla määritellään komponenttien paikat koordinaatistossa. Näiden lisäksi malliin kuuluu myös pistejouk-

koja sisältäviä sketchejä, joita käytetään komponenttien tai piirteiden monistamiseen, sekä kaikkien reikien yms. leikkausten profiilit määrittävät sketchit.

Palkin poikkileikkauksen ääriviivat on aluksi mallinnettu yhteen sketchiin XY-tasolle kuvan 4.1.5 tapaan, jolloin eri komponenttien mittoja muuttamalla voidaan määrittää kaikkien poikkileikkauksen osien sijainti palkin poikkileikkauksessa, sekä osien poikkileikkausten muoto.



Kuva 4.1.5: Skeleton-mallin poikkileikkaus

Tämän jälkeen osien määrittämiseen tarvittavat geometriat piirretään omiin sketcheihin joko kopioimalla geometria suoraan pääsketchistä tai tarkentamalla pääsketchin geometriaa, jotta osien piirteet voidaan määrittellä. Tällä tavoin osia mallintaessa voidaan poikkileikkauksen geometria siirtää kyseiseen osaan suoraan hyödyntämällä SolidWorks:n sketch-työkalussa ”Convert Entities”-toimintoa. Tällöin osatasolle ei tarvita geometrian määrittämiseksi mittoja tai muita rajoitusehtoja, vaan osien geometria muuttuu skeleton-mallin mukaan.

Komponenttien pituudet määritellään skeleton-osan XZ-suuntaisilla sketcheillä, joissa kullekin eripituiselle osalle on määritetty alku- ja loppupisteet. Näin osien malleille ei tarvitse antaa erillistä pituustietoa, jolloin osatasojen välisiä yhtälöitä ei tarvita niin paljon.

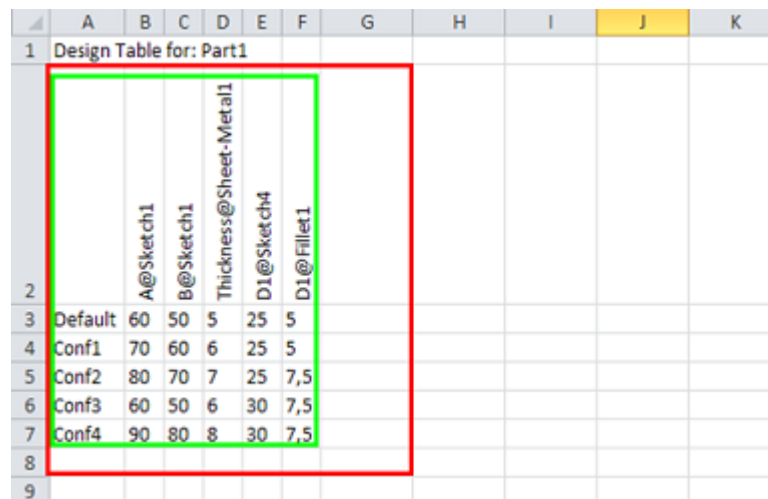
Sketchien lisäksi skeleton-malli sisältää muuttujia SolidWorks:n ”Global Variables”-osion alla. Näiden muuttujien tarkoituksena on välillisesti ohjata joidenkin mallien piirteiden sammuttamista ja takaisin päälle kytkemistä. Esimerkiksi palkin sisemmissä päätylevyissä voi olla leikkaukset ilmansyötölle sen mukaan, kummassa päässä palkkia ilmansyöttö sijaitsee ja kummassa päässä palkkia kyseistä osaa milloinkin käytetään. Yhtälöt, jotka kykevät halutut piirteet päälle tai pois, lukevat muuttujan arvon skeleton-osasta. Piirteitä ohjaavien parametrien lisäksi ”Global Variables”-muuttujia hyödynnetään osien piirustuksissa. Tästä on kerrottu tarkemmin luvussa 4.1.4.

Skeleton-mallinnuksen yksi suurimpia hyötyjä tämäntyyppisessä parametrisessa mallissa on, että sellaiset piirteet, jotka toistuvat useissa eri osissa, kuten kohdistusnastat tai kohdakkain asetettavat reiät, voidaan määrittellä saman sketchin avulla. Tämän ansi-

osta kyseiset piirteet ovat malleissa aina kohdakkain niin kauan, kun kaikki mallit on määritetty saman skeleton-mallin avulla. Tällöin mahdolliset muokkaukset vaikuttavat automaattisesti kaikkiin malleihin, joissa kyseistä piirrettä on käytetty, eikä jokaista mallia tarvitse käydä muokkaamassa erikseen.

4.1.3. Design Table-taulukko

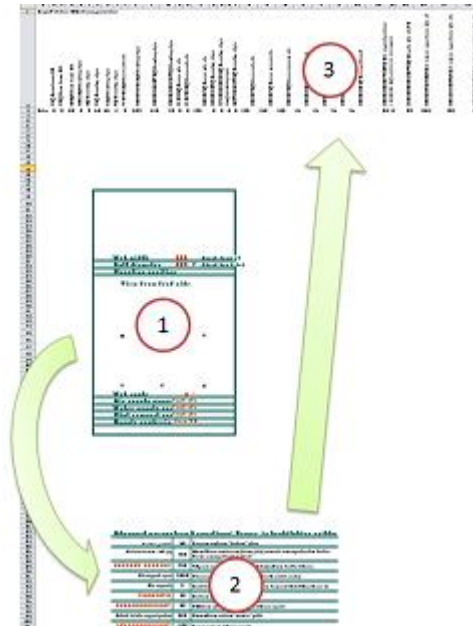
Kuten luvussa 4.1 todettiin, on Design Table-taulukon tehtävänä tässä suunnittelumallissa ohjata skeleton-osan geometriaa sekä toimia käyttöliittymänä mallin muokkaamiselle. Tavallisesti taulukkoa käytetään luomaan malleista samaan tiedostoon useampia versioita (konfiguraatioita), jotka eroavat toisistaan esimerkiksi joidenkin mittojen tai piirteiden osalta. Excel-taulukossa pystysarakkeet vastaavat muokattavaa mittaa tai piirrettä, ja vaakarivit vastaavat mallin eri konfiguraatioita. SolidWorks etsii taulukosta tietoa, kunnes viimeisen konfiguraatietietojen sisältävän sarakkeen jälkeen tulee tyhjä sarake, sekä vastaavasti viimeisen konfiguraatietietojen sisältävän vaakarivin jälkeen tulee tyhjä rivi (kuva 4.1.6, esimerkki taulukosta).



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Design Table for: Part1										
2		A@Sketch1	B@Sketch1	Thickness@Sheet-Metal1	D1@Sketch4	D1@Fillet1					
3	Default	60	50	5	25	5					
4	Conf1	70	60	6	25	5					
5	Conf2	80	70	7	25	7,5					
6	Conf3	60	50	6	30	7,5					
7	Conf4	90	80	8	30	7,5					
8											
9											

Kuva 4.1.6: Esimerkki Design Table-taulukosta

Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi kuvan 4.1.6 mukaisessa taulukossa punaisella kehystetyn alueen ulkopuolelle voidaan sijoittaa mitä vain, aivan kuten normaalissa Excel-laskentataulukossa, eikä punaisen alueen ulkopuolelle sijoitettu tieto vaikuta vihreällä kehystettyjen tietojen toimintaan, ellei vihreän alueen soluja ole erikseen kytketty yhtälöiden avulla punaisen alueen ulkopuolella sijaitseviin soluihin. Tämä on parametrisen mallin toteuttamisen kannalta erinomainen ominaisuus, sillä tietojen käsittelyn ja laskennan kannalta Excel on tehokas työkalu, jonka avulla erilaisten funktioiden lisäksi esimerkiksi taulukoidun tiedon käsitteleminen toimii tehokkaasti eikä vaadi esimerkiksi VBA-ohjelmointitaitoa.



Kuva 4.1.7: Taulukot parametrisessa mallissa

Kostutinpalkin Design table-taulukko on rakenteeltaan kuvan 4.1.7 taulukon kaltainen. Numerolla 1 merkityssä kohdassa on käyttöliittymäikkuna, jossa on määritettävissä taulukossa 3.2.2 esitetyt kostutinpalkin parametrit. Näiden parametrien avulla määritellään numerolla 2 merkityssä taulukossa sketcheihin syötettävät mitat. Syy, miksi nämä laskutoimitukset ja parametrit on sijoitettu näin, on se, että tällä tavoin taulukossa on enemmän tilaa kommenteille. Tämän lisäksi parametrit on ryhmitelty kohdan 2 listassa sen mukaan, mitä piirteitä ja ominaisuuksia ne mallissa ohjaavat. Näin järjesteltynä on myös mahdollista käyttää erilaisia apumuuttujia, jotka selkeyttävät parametrien määrittelyä ja mahdollistavat sen, että tulevaisuudessa taulukkoa ja parametrin mallia voivat muokata muutkin kuin pelkästään mallin alkuperäinen tekijä. Taulukossa apumuuttujat on erotettu varsinaisista mallia ohjaavista mitoista siten, että mallia ohjaavien parametrien nimet on korostettu oranssilla värillä ja lihavoimalla teksti, kuten kuvassa 4.1.8. Kohdan 2 taulukko sisältää yhteensä 250 muuttujaa ja apumuuttujaa.

Sijoittelemalla mallin määrittelemiseksi tarvittavia apumuuttujia tällä tavalla voidaan osittain varautua mahdollisiin muutoksiin, joita palkkiin voidaan odottaa tulevaisuudessa tulevan. Esimerkiksi palkin ilmansyöttöliityntöjen lukumäärä määritellään kostutinpalkin ilmankulutuksen mukaan, joka luonnollisesti riippuu yksittäisen suuttimen ilmankulutuksesta. Suuttimen ilmankulutus on yksi kohdassa 2 esitettävistä muuttujista, vaikka se ei yksinään ole suoraan kytkettynä mihinkään geometriaa ohjaavaan sketchiin. Mikäli tulevaisuudessa suutinrakennetta muutetaan, minkä seurauksena ilmankulutus muuttuu, täytyy vain käydä muuttamassa ilmankulutuksen arvo taulukkoon, jolloin tarvittavien ilmaliityntöjen määrä päivittyy uutta tilannetta vastaavaksi, eikä mallia tarvitse lähteä muokkaamaan sen syvällisemmin. Kaikkia mahdollisia muutoksen kohteena olevia asioita on tietysti mahdotonta ennustaa etukäteen, mutta niiltä osin kuin se on mahdollista, voidaan muutoksiin varautua mallin järkevällä suunnittelulla ja määrittelyllä.

211			
212	End bracket length	80	Päätyjen pienän pituus (näkyvä osuus)
213			
214	Mounting area	40	Väli- ja päätypienojen huoltoluukun alle jäävän osuuden leveys per luukku
215			
216	BRACKETEND	125	Päätypienan keskitason etäisyys origosta.
217			
218	COVER1	395	Ensimmäisen luukun keskikohdan paikka

Kuva 4.1.8: Parametrit taulukossa

Kohdasta 2 mallia ohjaavien parametrien solujen sisältö kopioidaan riville, josta tiedot siirtyvät malliin (numeroitu kohta 3 kuvassa 4.1.7). Yhteensä mallia ohjaavia parametreja on 194 kappaletta. Parametrit päivitetään taulukosta malliin sarake kerrallaan lähtien vasemmanpuolimmaisesta sarakkeesta, ja mikäli jokin arvo ei ole kelvollinen (esimerkiksi negatiivinen luku), keskeytyy mallin päivitys. Parametrien järjestyksen on tämän vuoksi oltava kuvan 4.1.4 matriisin mukainen, jotta tarvittavat tiedot ovat aina olemassa uusia arvoja päivitettäessä, eikä mallien päivittämiseen tarvita iteroivia laskutoimituksia mallin sisällä. Normaalia käyttöä varten Excel-taulukosta piilotetaan kaikki muut paitsi käyttöliittymäikkuna (merkitty kuvassa 4.1.7 numerolla 1), jotta mallin tahaton muokkaaminen muualta paitsi mallia määrittelevien parametrien osalta olisi mahdollonta.

4.1.4. Osien työpiirustukset

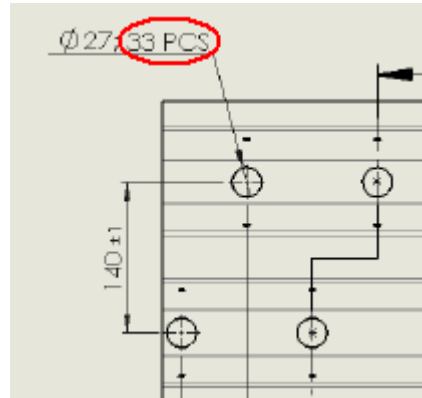
Parametrisellä mallilla tuotettavien osien piirustusten suunnitteluun liittyy muutamia tekijöitä, jotka tulee ottaa huomioon, jotta piirustukset muokkautuisivat mahdollisimman hyvin mallin mukaan, eikä suuria manuaalisia korjauksia tarvitsisi tehdä. Olennaisinta on selvittää, mitkä pinnat säilyvät malleissa ja niiden piirustuksissa muuttumattomina parametrien muuttuessa ja mitkä ovat sellaisia piirteitä, joiden mitoitus varten tarvitaan apugeometriaa.

Useimmissa piirustuksissa kappaleen ääriviivojen mittaviivat säilyvät paikoillaan, vaikka osan pituutta muutetaan. Sen sijaan muuttuvat piirteet, kuten toistuvat reikäkuviot ja leikkaukset ovat sellaisia piirteitä, joissa tapauksesta riippuen vain muutamien ensimmäisten reikien mitoituksessa tarvittavat pinnat säilyvät malleja muokattaessa. Tähän ongelmaan ratkaisuna on mallintaa osaan ylimääräinen apugeometria, joka sisältää esimerkiksi pisteen tai poikkiviivan sillä kohtaa, missä kyseisen toistuvan piirresarjan viimeinen elementti on. Koska kopioitavien piirteiden lukumäärät ja elementtien välit on jo kertaalleen määritetty skeleton-osassa, saadaan viimeisen elementin paikka määritettyä suoraan skeleton-osassa määritellyillä arvoilla eikä uusia muuttujia tarvita. Tämän jälkeen kyseisen piirteiden viimeisen elementin mitoitus tehdään kyseiseen apugeometriaan, jonka paikka muuttuu skeleton-mallia muokatessa. Kokoonpanoissa (jotka sisältävät aina yhtenä osana skeleton-mallin) voidaan mitat kytkeä suoraan skeleton-malliin, jolloin erillistä mallikohtaista apugeometriaa ei välttämättä tarvita.

Mittojen lisäksi apugeometrioilla ohjataan piirustuksissa katkaistujen projektoiden katkaisuviivojen paikkaa. Normaalisti mallin pituutta muutettaessa pidemmäksi ei projektiio enää mahtuisi piirustusarkille, joten skeleton-malliin tehdään apugeometria, joka

sisältää pisteet katkaisuviivojen paikkojen määrittämiseksi. Näiden pisteiden paikat muuttuvat palkin pituuden muuttuessa, joten projektiot mahtuvat piirustusarkille ilman, että arkkikokoa tai skaalaa tarvitsee muuttaa.

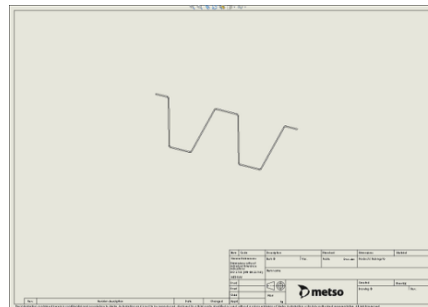
Toinen tärkeä ominaisuus, joka voidaan tuoda piirustuksiin, ovat erilaisten toistuvien piirteiden elementtien lukumäärätiedot, kuten esimerkiksi suuttimen reikien lukumäärä kuvassa 4.1.9.



Kuva 4.1.9: Kopioitavien piirteiden lukumäärä

Tällöin piirustuksissa tarvittava reikien lukumäärän tieto on tuotava kyseisen komponentin malliin skeleton-osan tiedoista, minkä jälkeen arvot tallennetaan mallin ”Custom Properties”-tietoihin. Näitä tietoja voidaan SolidWorks:ssa linkittää suoraan piirustuksien tekstikenttiin, joten ne toimivat hyvin työpiirustuksien automatisoimisen apuna.

Mikäli komponenttien pääpinnat eivät ole samansuuntaisia mallin pääkokoonpanon pääkoordinaattiakselien kanssa, ovat kyseisen osan projektiot piirustukselle tuotaessa vinossa, kuten kuvassa 4.1.10.



Kuva 4.1.10: Vino projektio

Projektioiden suunnat voidaan määritellä manuaalisesti haluttujen viivojen mukaisesti, mutta tällöin ongelmaksi jää se, että tilanteessa, jolloin pintojen kulma päätasojen suhteen muuttuu, projektiot ovat jälleen vinossa arkilla. Tällöin ainoa vaihtoehto on paikoittaa tällaiset osat, joissa ongelmaa mahdollisesti esiintyy, perustasoistaan skeleton-mallin viivoihin kokoonpanojen rajoitusehtojen avulla, jolloin komponentin päämuodot ovat perustasojen suuntaisia.

Koska eri osissa on paljon sellaisia piirteitä, jotka kytkeytyvät päälle vain joillakin parametriyhdistelmillä, tulee piirustusten asetuksia muuttaa siten, että mitat ja merkit, joihin liittyvä geometria kytetään pois päältä, piilotetaan automaattisesti. Nämä asetukset ovat dokumenttikohtaisia, joten parametrin mallin käyttäjien ei tarvitse tehdä erik-

seen muutoksia SolidWorks:n asetuksiin, vaan asetukset kulkevat dokumenttien mukana.

Piirustusten kohdalla suunnittelijan vastuulle projektikohtaisten osien työpiirustusten osalta jää piirustusten oikeellisuuden tarkistaminen sekä mittojen asettelu oikeille paikoilleen tarvittaessa. SolidWorks:ssa ainoa mahdollisuus lukita mittojen paikkoja on lukita mitan arvo mittaviivojen keskelle. Itse mittaviivojen pituutta ei voida lukita, joten joissain piirustuksissa on väistämätöntä, että parametreja muokattaessa mittojen paikat hyppäävät kauemmaksi tai lähemmäksi projektiota, jolloin ne on käytävä vetämässä oikeille paikoilleen manuaalisesti. Vaihtoehtona voisi olla myös makron tekeminen, joka asettelisi mitat oikeille paikoilleen tai mitoittaisi koko piirustuksen ennalta määrättyjen mittojen osalta.

Piirustusten automatisoimisen kohdalla tulee kuitenkin pitää mielessä, että siinä vaiheessa, kun mallit ja piirustukset siirretään tuotetiedonhallintajärjestelmään, tulee piirustuksen ”piirtänyt”-kenttään sen henkilön nimikirjaimet, joka luo projektikohtaiset piirustukset parametrin mallin avulla. Piirustusten ”tarkastanut”-kenttään puolestaan tulee sen henkilön nimikirjaimet, joka käy määrittämässä kyseisen dokumentin tilan hyväksytyksi. Mikäli piirustukset tehtäisiin täysin automaattisiksi, voisi mallia käyttävä suunnittelija periaatteessa joutua ottamaan vastuun mahdollisista virheistä, joita mallissa ja sen piirustuksissa saattaisi olla, mikäli ei tarkastaisi piirustuksia ollenkaan. Siksi ei ole juurikaan haitaksi, vaikka suunnittelijat joutuvat käymään piirustukset läpi ja tekemään niihin pieniä kosmeettisia korjauksia, kuten mittaviivojen siirtämisiä oikeille paikoilleen.

4.2. Mallin käyttö ja käytettävyys

Mallin toiminnan ja hyödyllisyyden kannalta on ensiarvoisen tärkeää, että vaikka malli olisi rakenteeltaan monimutkainen, on sen oltava peruskäytön osalta helppokäyttöinen. Käytettävyyttä arvioitaessa on huomioitava parametrin mallin käyttöönoton vaikutukset koko suunnittelu ympäristössä, eli millaisia muutoksia aiheutuu suunnittelussa käytettävien järjestelmien käyttöön. Lisäksi on syytä arvioida, kuinka hyvin suunnittelijat pystyvät omaksumaan tämän tyyppisten mallien käytön sekä millaisia riskejä parametrin mallien käyttöönotosta aiheutuu.

4.2.1. Parametrien muuttaminen – käyttöliittymä

Kuten aikaisemmin on jo todettu, tapahtuu mallin muokkaaminen avaamalla pääkoonpanoa ohjaava skeleton-osa, jonka Design Table-tiedosto sisältää mallia ohjaavat parametrit. Käyttöliittymän tarvetta ja tyyppiä miettiessä tulee ottaa huomioon, ketkä mallia käyttävät ja millaisia muutoksia varsinaisen käyttöliittymän kautta malliin on voitava tehdä.

Toinen ääripää käyttöliittymälle on se, että käyttöliittymää ei ole ollenkaan, jolloin kaikki muutokset on tehtävä suoraan Design Table-aulukon tiettyihin soluihin. Tällöin olisi lähes mahdotonta rajoittaa parametreille syötettäviä arvoja siten, että ne tuottaisivat

aina kelvollisen geometrian. Tällaisessa tilanteessa mallia muokkaavan henkilön tulisi olla mallin toiminnasta niin hyvin perillä, että väärin arvojen syöttämistä ei tapahtuisi. Mikäli taulukkoon syötetään sellaisia arvoja, joiden seurauksena esimerkiksi joidenkin geometrian viivojen pituus saa arvon 0 tai negatiivisia arvoja, ei taulukon arvojen muuttaminen takaisin välttämättä korjaa tilannetta, sillä SolidWorks ei aina osaa kääntää kaikkia viivoja takaisin oikeisiin suuntiin, mikäli niiden arvon etumerkki on vaihtunut. Toisaalta, mikäli taulukko on kokonaisuudessaan vapaasti muokattavissa, voi mallin muokkaaminen varsinaisten suunnitteluparametrien ulkopuolella olla varsin nopeaa, mikäli mallia muokkaava henkilö tietää, mitä on tekemässä.

Kostutinpalkin mallin käyttöliittymästä päätettiin kuitenkin tehdä mahdollisimman yksinkertaistettu ja rajoitettu. Ainoat valittavissa olevat parametrit ovat taulukon 3.2.2 parametrit, joiden avulla malli määritellään. Koska käyttöliittymä on Excel-tiliä, voidaan parametrien syöttämisessä käyttää apuna Excelin tietojen kelpoisuuden tarkastamisominaisuutta. Näin esimerkiksi rataaleveyden arvoista voidaan tehdä vetovalikko, jolloin väärin arvojen valitseminen ei ole mahdollista. Lisäksi telan halkaisijan arvoille voidaan määrittää minimi- ja maksimirajat, jotta malli pysyy oikein määriteltynä kaikilla parametrien arvoilla.

Käyttöliittymään jätetään näkyviin vain kuvassa 4.2.1 näkyvät mallin ohjaukseen tarvittavat solut. Kaikki muut tiedot taulukosta piilotetaan, minkä lisäksi taulukon solut lukitaan niin, että ainoastaan kuvassa 4.2.1 näkyviä käyttöliittymän mallia ohjaavia parametreja voidaan muokata.

The screenshot shows an Excel spreadsheet interface for the 'metso IO moisturizer' model. The interface includes a 3D model of the device at the top. Below the model, there are input fields for 'Web width' (2010), 'Roll diameter' (1200), and 'Mounting position'. A 'View from tend side' section contains six circular diagrams showing different mounting configurations. At the bottom, there are input fields for 'Web angle' (5°), 'Air supply connection' (Tend side), 'Water supply connection' (Tend side), 'Mist removal connection' (Tend side), and 'Nozzle numbering' (Start from TS).

Kuva 4.2.1: Mallin käyttöliittymä Excelissä

Tällä menettelyllä varmistetaan, ettei kukaan voi tietämättömyyttään mennä muokkaamaan taulukon toimintaa ja siten mahdollisesti saattaa mallia epäkuuntoon. Toinen tärkeä yksityiskohta mallin toiminnan varmistamiseksi on piilottaa kaikki muut arkkit

paitsi ensimmäinen välilehti Excel-taulukosta. Välilehdillä 2 ja 3 on taulukoituna esimerkiksi rataleveyden arvoja, joita käytetään rataleveyden vetovalikossa. Mikäli Design Table:sta poistetaan niin, että taulukosta on aktiivisena jokin muu kuin ensimmäinen välilehti, kaatuu SolidWorks, eikä mallin muokkaaminen onnistu.

4.2.2. Mallin käytön muutokset suunnitteluympäristössä

Metso Automationilla tuotekehitysosaston mekaniikkasuunnittelussa käytetään dokumenttien ja nimikkeiden hallinnassa Aton-tuotetiedonhallintajärjestelmää. SolidWork:ssä on käytössä SolidPDM-lisäosa, joka toimii Atonin käyttöliittymänä SolidWorks:n yhteydessä. Tällöin mallien muokkaaminen käytännössä poikkeaa normaalista kovalevy- tai verkkolevyhakemistotyöskentelystä siinä, että ennen kuin dokumentteihin (3D-malleihin, piirustuksiin jne.) voidaan tehdä muutoksia, tulee ne varata itselle käyttöön. Samoin kun muutokset dokumentteihin on tehty, vapautetaan dokumentit takaisin järjestelmään, jolloin myös muut käyttäjät näkevät, mitä muutoksia dokumentteihin on tehty.

Parametrissa mallia tai tuotekonfiguraattoreita käytettäessä Aton/SolidPDM-ympäristössä aiheutuu toimintaan pieniä muutoksia. Tärkeimmät muutokset liittyvät uusien projektien dokumenttien luomiseen sekä muutosten tallettamiseen projektikohtaisiin dokumentteihin.

Kun projektikohtaisia dokumentteja lähdetään luomaan SolidPDM:n kautta, on huomioitava, ettei SolidWorks:n normaali Pack and Go-ominaisuus toimi täysin normaalilla tavalla. Tämä johtuu muun muassa siitä, että SolidPDM:n kautta Atonissa olevat dokumentit avataan oletuksena Read Only-tilaan, jollei käyttäjä erikseen varaa tiedostoja itselleen. Tällöin Pack and go-ikkuna jää aina jumittamaan, mikäli käyttäjä yrittää valita kaikkia rakenteeseen kuuluvia piirustuksia mallien lisäksi tallettavaksi kovalevylle. Lisäksi mikäli käytetään SolidPDM:n Export-toimintoa, ei SolidPDM osaa käsitellä kokoonpanojen sisäisiä referenssejä, vaan kokoonpanoja siirrettäessä kovalevylle toiseen hakemistoon jää osa tiedostoista puuttumaan.

Konfiguraattoreilla toteutettuja, sekä muiden sisäisiä referenssejä sisältävien dokumenttien kopioimista varten SolidPDM:ssä on olemassa ”Edit All”-toiminto. Tämän toiminnon avulla saadaan kaikki nimikerakenteen dokumentit varattua itselle ja kopioitua omaan kansioon kovalevylle. Tämän jälkeen, kun näitä samoja malleja tuodaan takaisin Aton:iin SolidPDM:n Import-toiminnon avulla, tunnistaa järjestelmä, että dokumentit (tai ainakin osa niistä) on jo aikaisemmin tallennettu PDM-järjestelmään, jolloin käyttäjä voi valita, korvataanko vanhat dokumentit vai luodaanko kokonaan uudet dokumenttikortit.

Edit All-toiminnon käyttämistä järkevästi on myös syytä pohtia, sillä ominaisuuden haittapuolena on se, että tällöin käyttäjä varaa itselleen aina kaikki tuoterakenteeseen kuuluvat dokumentit ja nimikkeet, mikä estää esimerkiksi vakiokomponenttien, kuten ruuvien, 3d-mallien muokkaamisen samanaikaisesti muiden käyttäjien toimesta. Tämän vuoksi järkevää olisi, että itselle varatut dokumenttirakenteet kopioitaisiin omalle kovalevylle johonkin tilapäiseen hakemistoon, jonka jälkeen dokumentit ja nimikkeet vapautte-

taan heti muiden käytettäväksi. Tämän jälkeen käytetään tilapäishakemistoon tallennettuja dokumentteja, joihin tehdään tarvittavat parametrien muokkaukset ja siirretään sen jälkeen takaisin tuotetiedonhallintajärjestelmään.

Yksi vaihtoehtoinen tapa tehdä uudet projektikohtaiset dokumentit on hivenen manuaalisempi ja enemmän klikkailua vaativa, mutta huolellisesti toteutettuna kuitenkin yhtä toimiva. Tällöin ylimmässä kokoonpanossa tehdään yksitellen projektikohtaisesti muokkautuvien osien malleista uudet dokumentit ja nimikkeet varaamalla dokumentit yksitellen ja vapauttamalla ne sen jälkeen uusille nimikkeille. Kun malli, jolla on viittauksia kokoonpanoon, jonka osana se on, vapautetaan uudelle dokumentti- ja nimikenumeroille, päivittyvät kyseisen uuden dokumentin ja nimikkeen viittaukset vastaamaan tätä uutta kokoonpanoa. Lopuksi vapautetaan kokoonpano ja tehdään kokoonpanosta myös uusi nimike ja dokumentti. Vakiokomponenttien nimikkeet ja dokumentit pysyvät pääsääntöisesti samoina. Mikäli niihin tehdään muutoksia, ovat ne pysyviä, ja tulevat koskemaan kaikkia tulevia projekteja.

Vakio- ja projektidokumenttien erottamista toisistaan voidaan helpottaa ryhmittelemällä mallit SolidWorks-osapuussa niin, että vakiokomponentit ja projektikohtaisesti muuttuvat dokumentit sijaitsevat omissa kansioissaan. Mikäli projektikohtaisten dokumenttien ja nimikkeiden luominen joudutaan toteuttamaan edellä mainitulla tavalla, on tulevaisuudessa syytä panostaa erityisesti tämän työvaiheen ohjeistukseen.

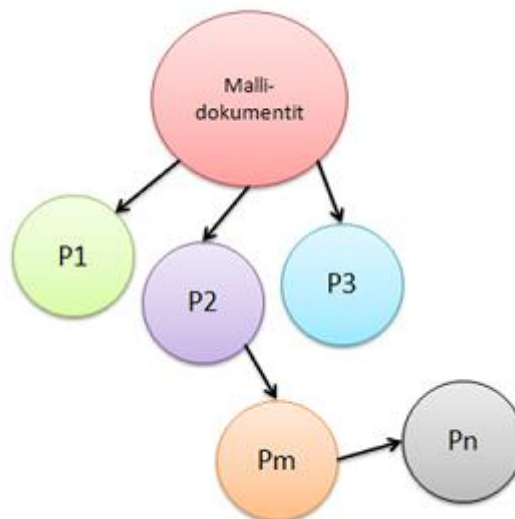
Yksi keskeisimmistä eroista normaaliin kovalevy- ja hakemistotyöskentelyyn parametristen mallien käytössä Aton-ympäristössä tulee esille parametrien arvoja muokattaessa. Mikäli käyttäjä varaa itselleen pääkokoonpanon ja parametrit ohjaavan geometrian sisältävän skeleton-osan ja käy muokkaamassa parametreja, näyttää siltä, kuin kaikki parametrit olisivat päivittyneet aivan oikein malleihin. Mikäli tämän jälkeen vapautetaan pääkokoonpano ja avataan jokin kokoonpanon yksittäinen osa, huomataan, että osan pituus ym. parametrit ovat säilyneet edelleen muuttumattomana. Tämän takia ennen parametrien muokkaamista on välttämätöntä käydä varaamassa kaikki rakenteen dokumentit itselleen, jotta muutokset parametreihin päivittyvät kaikkiin malleihin ja ovat näkyvissä myös silloin, kun yksittäisten osien mallit avataan ilman, että osat sisältävät kokoonpanot ovat auki.

4.2.3. Muutosten hallinta

Nykyisessä kostutinpalkkien suunnittelutoiminnassa yksi selkeitä ongelmakohteita on tuotteeseen tehtyjen parannusten ja muutosten saattaminen uusiin projekteihin. Ongelmana on ennen kaikkea se, että mikäli henkilöstö vaihtuu projektien välillä, saattavat jotkut hyväksi todetut ratkaisut jäädä käyttämättä ja vastaavasti vanhat virheet toistuvat, koska viimeisimmät muutokset palkkien rakenteissa eivät välttämättä ole kaikkien suunnittelijoiden tiedossa. Malliprojektien tiedostot on tähän asti tallennettu tuotetiedonhallintajärjestelmään zip-paketteina, minkä lisäksi projektien mallit on tallennettu verkkolevyille omiin hakemistoihinsa. Lisäksi kostutinpalkeista on ylläpidetty ns. tuotekehitysmuistiota, johon on kirjattu kehitysideoita sekä projektit, joissa kyseiset ideat on toteutettu ensimmäisen kerran.

Tuotekehitysmuistiota selaamalla käy hyvin ilmi ongelma kehitysideoiden siirtämisestä tuotteisiin. Useassa tapauksessa haluttu muutos on toteutettu, mutta seuraavassa projektissa on jälleen palattu ilman mitään selkeästi nähtävää syytä vanhoihin ratkaisuihin. Ongelmat johtuvat paljolti siitä, että tieto suunnitteluohjeiden, malliprojektien, muistioiden jne. muodossa on hajautunut useaan paikkaan. Tästä seuraa usein se, että mikäli projekti-insinööri, joka kustutinpalkkia suunnittelee, ei ole tietoinen kaikkien ohjeistojen olemassaolosta, turvautuu hän useimmiten vain vanhojen projektien malleihin, joista uudet voidaan muokata.

Osittain parametrusten mallien tai konfiguraattorin puute kärjistää tätä tilannetta, sillä nykyisellä suunnittelutavalla nopein tapa suunnitella uusi kustutinpalkki on kopioida mallit lähtökohdaksi jostain vanhasta projektista, jossa koneen rataleveys on sama tai lähellä uuden projektin rataleveyttä, jolloin dokumenttien historiasta tulee kuvan 4.2.2 kaltainen. Tällöin eniten aikaa vievät muutokset mallissa, kuten imukaukaloiden, ilman syöttöliityntöjen ja ilmakaavareiden sylinterien määrät, voidaan todennäköisesti jättää tekemättä. Vastaavasti tällainen projekti, jossa rataleveys osuu lähelle oikeaa, voi olla hyvinkin vanha, jolloin se saattaa sisältää joitain sellaisia ratkaisuja, joita on myöhemmissä projekteissa parannettu.



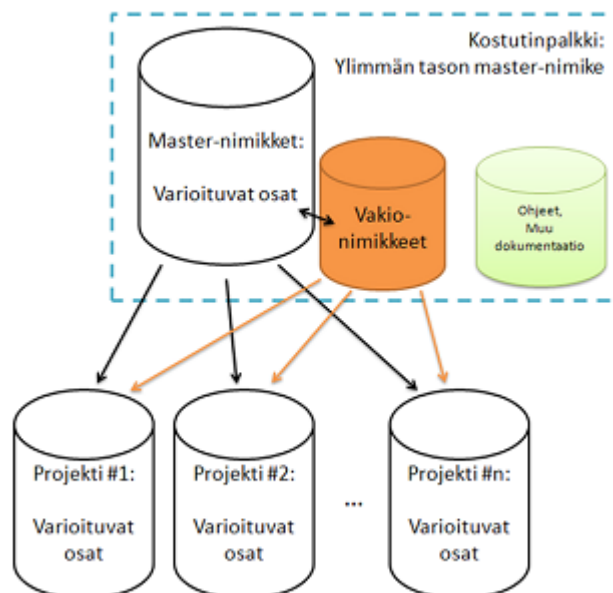
Kuva 4.2.2: Dokumenttien periytyminen

Yksi esimerkki tuotekehityksen tuotosten katoamisesta projektien välillä liittyy palkin suihkunsäätömekanismiin. Suihkunsäätömekanismin tarkoituksena on yksinkertaisesti peittää osa palkin laitimmaisten suuttimien sumusta, jolloin kostutusvyöhykkeen leveyttä voidaan säätää tarvittaessa tarkemmin. Tällainen tarve saattaa esiintyä esimerkiksi silloin, kun paperikoneella tuotetaan useampia erilaisia paperilaatuja, jolloin tuotettavan paperilaadun vaihtuessa myös rataleveys muuttuu hieman. Silloin kostutusvyöhykkeen leveyttä on voitava säätää, jotta kustutin toimii optimaalisesti myös radan reunoilla.

Vanhan suihkunsäätömekanismin ongelmia olivat muun muassa se, ettei säätöä voitu tehdä koneen käydessä, minkä lisäksi mekanismin rakenne aiheutti toisinaan tiivistyneen veden vuotamista palkin päädyistä. Vuonna 2010 erääseen projektiin suunniteltiin

toisenlainen suihkunsäätörakenne, jolla pyrittiin vähentämään vuotamisongelmia, minkä lisäksi suihkun leveyttä voitiin säätää koneen ulkopuolelta. Projektin yhteydessä tämä rakenne todettiin toimivaksi, joten muutokset merkittiin tehdyksi aikaisemmissa luvuissa mainittuun tuotekehitysmuistioon. Näitä muutoksia ei kuitenkaan päivitetty tuotetiedonhallintajärjestelmässä oleviin 4-rivisen kostutinpalkin malliprojektin malleihin, tai verkkolevyllä oleviin malliprojektin tiedostoihin. Mahdollisesti tämän vuoksi seuraavassa kostutinprojektissa oli jälleen palattu vanhaan suihkunsäätömekanismiin vaikka uusi, joiltain osa-alueilta parempi rakenne olisi ollut olemassa. Tämän jälkeen uusi ratkaisu on esiintynyt joissakin projekteissa.

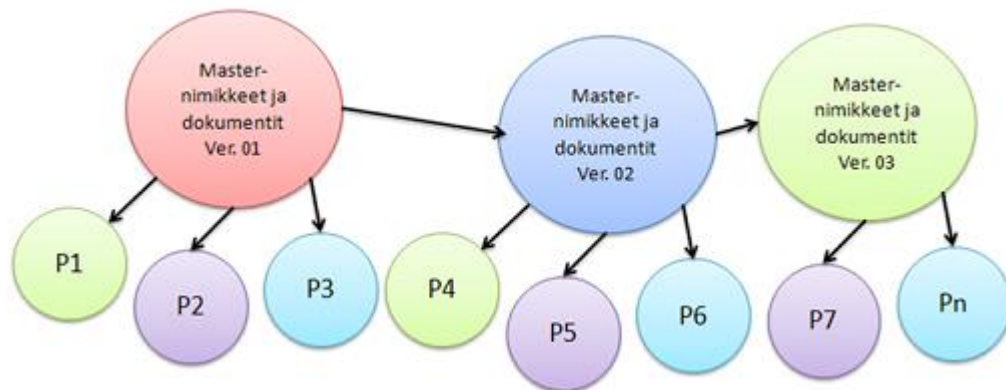
Uusien SolidWorks:lla mallinnettujen kostutinpalkin mallien myötä pyritään keskitämään kaikki tarvittava suunnittelutieto tuotetiedonhallintajärjestelmään. Koska Aton-tuotetiedonhallintajärjestelmään tallennettavia SolidWorks-malleja ja niihin liittyviä nimikkeitä voidaan hallita suoraan SolidPDM-käyttöliittymän avulla, ei malleja tarvitse tallentaa järjestelmään zip-paketeissa, mikä tuo muutosten hallintaan tarvittavaa joustavuutta ja nopeutta. Kuvassa 4.2.3 on hahmoteltu kostutinpalkin nimikkeiden ja dokumenttien välisiä riippuvuuksia tuotetiedonhallintajärjestelmässä.



Kuva 4.2.3: Dokumentit ja nimikkeet

Kostutinpalkin ylimmän nimiketason muodostaa kostutinpalkin niin sanottu master-nimike, joka sisältää kaikkien palkkirakenteen komponenttien ja alikokoonpanojen nimikkeet. Lisäksi master-nimikkeelle linkitetään muu tarpeellinen dokumentaatio, kuten esimerkiksi parametrin mallin käyttöohje. Master-nimikkeen ideana on, että uuden projektin alkaessa kopioidaan uuden projektin projektikohtaisille nimikkeille mallit viimeisimmästä hyväksytystä master-nimikerakenteesta. Kostutinpalkin muuttumattomana säilyviä osia käytetään sellaisenaan myös uudessa projektissa, joten niiden mallit sekä valmistusdokumentit ovat jo olemassa. On ehdottoman tärkeää korostaa suunnitteluohjeissa, että uudet dokumentit ja nimikkeet kopioidaan nimenomaan master-nimikkeistä, eikä vanhojen projektien projektinimikkeistä. Rakenteen muutosten hallintaa master-

nimikkeiden versioiden avulla on havainnollistettu master- ja projektinimikkeiden välistä riippuvuuksia ja periytyvyyksiä esittävässä kuvassa 4.2.4.



Kuva 4.2.4: Versionhallinta

Kun kustutinpalkin rakenteeseen tehdään muutoksia, tehdään master-nimikkeistä ja niiden dokumenteista uudet versiot, jolloin muutokset periytyvät master-dokumenttien ja -nimikkeiden kautta tuleviin projekteihin. Master-nimikkeistä ainoastaan uusin versio on hyväksytty-tilassa (Active), jolloin vanhoja (Not available), tai työn alla olevia (Draft) nimikkeitä ei voida käyttää uusissa projekteissa. Projektikohtaiset nimikkeet tulevat myös olemaan hyväksytty-tilassa (Active), joten tuotetiedonhallintajärjestelmän mahdollistamien nimikkeiden tilojen avulla ei valitettavasti voida estää projektikohtaisten nimikkeiden käyttämistä lähtökohtana uusia projekteja luotaessa. Tässä tapauksessa on jälleen korostettava ohjeistuksen merkitystä sekä sitä, että suunnittelijoiden on ymmärrettävä, että parametrinen mallin avulla projektikohtaisten mallien ja valmistuspiirustusten luominen on lähestulkoon yhtä nopeaa riippumatta siitä, mitkä ovat mallin parametrit ennen mallin muokkaamista.

Master-nimikkeisiin sekä vakio-osien nimikkeisiin liittyvät mallit ja piirustukset ovat niin ikään hyväksytty-tilassa (FINAL). Näin ollen näitä dokumentteja ei voida muokata, ellei dokumenteista tehdä uutta dokumenttia (kopiota uudelle dokumenttitunnukselle) tai uutta revisiota. Tällä tavoin pyritään estämään master-dokumenttien tahaton muokkaus.

4.3. Parametrinen mallin elinkaari

Parametrinen mallin toteutuksessa on huomioitava myös eri ratkaisuiden vaikutukset mallin elinkaareen. Mallin elinkaaren mahdollista pituutta voidaan arvioida sekä tuoteperheen stabiileetin että suunnitteluohjelmistoihin liittyvän teknisen ympäristön stabiileetin perusteella.

4.3.1. Tuoteperheen elinkaari

Kustutinpalkkien tapauksessa tuoteperheeseen ja tuotteisiin kohdistuvat muutospaineet voidaan olettaa ainakin lähitulevaisuudessa tietyin varauksin kohtuullisen pieniksi. Tämän diplomityön parametrinen mallin kehitysprojekti on osa tuotekehitysprojektiä, jon-

ka yhteydessä kostutinpalkin rakennetta on kehitetty ennen kaikkea kustannustehokkaampaan ja joustavammin valmistettavaan suuntaan. Tiettyjen uusien ratkaisuiden kohdalla on niiden käytännön toimivuudesta vielä pientä epävarmuutta ainakin siihen asti, kunnes kyseiset osat ja osakokoonpanot voidaan testata prototyypeissä tai pilotti-projekteissa. Lopullisesti tietoa uusien kostutinpalkkien toimivuudesta saadaan, kun ensimmäiset palkit on toimitettu asiakkaille ja niiden toimivuudesta on saatu tietoa oikeissa tehdasympäristöissä. Täten voidaan olettaa, että uuteen rakenteeseen voidaan alkuvaiheessa joutua tekemään joitakin muutoksia, mutta tulevaisuudessa muutostiheys tulee pienenemään.

Kun mahdollisesti tarvittavat muutokset on saatu tehtyä, voidaan nykyiseen rakenteeseen verraten olettaa, että mikäli uusi palkkirakenne osoittautuu toimivaksi, tulevat 4-riviset kostutinpalkit säilymään verrattain muuttumattomina useita vuosia. Radikaaleja muutoksia voidaan odottaa ainoastaan, mikäli alalle tulee jotain uutta käänteentekevää teknologiaa tms., minkä seurauksena vanhoista laitteista tulee automaattisesti suorituskyvyltään tai hinnaltaan kilpailukyvyttömiä. Jos katsotaan Metso Automationin kostutinpalkkien kehitystä menneinä vuosina, voidaan havaita, ettei palkkien rakenteissa ole koettu kerralla kovin suuria muutoksia. Tätä taustaa vasten voidaan pitää hyvin todennäköisenä, etteivät paineet tuoteperheen radikaaliksi kehittämiseksi tule rajoittamaan parametrinen mallin käyttöikä.

Jotta parametrista suunnittelumallia voitaisiin mahdollisuuksien mukaan hyödyntää koko tuoteperheen elinkaaren aikana, on kyettävä siirtämään tuotteiden elinkaaren aikana niiden kilpailukyvyn säilyttämiseksi tarvittavat muutokset myös parametriseen suunnittelumalliin. Tämän vuoksi parametrista mallia tehtäessä on erityisen tärkeää pyrkiä erottamaan tuotteesta sellaiset tiedot ja ominaisuudet, jotka mahdollisesti ovat niitä, joita tulevaisuudessa voidaan joutua muokkaamaan, kuten luvussa 4.1.3 esitettiin mahdollisena esimerkkinä suuttimen osalta.

4.3.2. Suunnittelujärjestelmän elinkaari

Parametrinen mallin suunnittelujärjestelmän elinkaarella tarkoitetaan tässä työssä parametrinen mallin elinkaarta siinä ohjelmistojen ja järjestelmien ympäristössä, jossa sen on suunniteltu toimivan. Parametrinen mallin elinkaarelle riskejä voi tässä tapauksessa aiheutua muutoksista sekä CAD- että PDM-järjestelmissä ja niiden keskinäisessä vuorovaikutuksessa.

Mikäli CAD-järjestelmää päätetään vaihtaa SolidWorks:sta johonkin toiseen, tarkoittaisi se luonnollisesti sitä, että myös kostutinpalkin parametriseista suunnittelumallista tulee käytännössä hyödytön. Mallit toki voidaan avata myös muilla CAD-ohjelmistoilla tallettamalla ne ensiksi STEP-muotoon, mutta tässä muutoksessa malleista säilyy ainoastaan niiden ulkopintojen geometria. Parametrista mallia ohjaava Design Table-tiedosto voitaisiin tallentaa omaan tiedostoonsa, mutta sen hyödyntäminen sellaisenaan muissa CAD-ohjelmistoissa ei ole mahdollista.

Parametrinen mallin toimivuuden kannalta keskeisessä asemassa on SolidWorks:n Design Table-ominaisuus, johon koko mallin toiminta perustuu. Design Table-

ominaisuus on ollut SolidWorks:ssa todella kauan, joten Design Table:n voidaan sanoa olevan jo melko keskeinen ja laajalti käytetty ominaisuus SolidWorks:ssa. Mikäli Design Table kuitenkin poistuisi kokonaan käytöstä, tulisi kustutinpalkin mallista välittömästi lähes hyödytön. Tällöin vaihtoehtoina mallin geometrian ohjaamiselle voisi olla esimerkiksi uuden käyttöliittymän tekeminen API-rajapintaa hyödyntäen tai Excel-taulukon käyttö mallin ulkopuolella, jolloin yhtälöiden arvot voitaisiin tuoda malliin tekstitiedoston välityksellä.

Design Table:n toimintaan vaikuttaa lisäksi toiminta Excelin ja SolidWorks:n välillä. Mikäli esimerkiksi jossain tulevista Excel-versioista osa funktioiden kutsuista tai syntakseista muuttuisi, saattaisi se suurella todennäköisyydellä aiheuttaa ongelmia mallin toiminnassa. Toisaalta Excel on maailmanlaajuisesti niin laajasti käytössä oleva ohjelmisto, että tällöin voisi kuvitella, ohjelman sisältävän jonkinlaisen automaattisen muunnostyökalun, jolla asiakirjan funktioiden syntaksit päivitettäisiin vastaamaan uusia.

Tärkeä tekijä järjestelmien muodostamassa kokonaisuudessa on myös PDM- eli tuotetiedonhallintajärjestelmä. Parametrinen suunnittelumallin kannalta on tärkeää arvioida, millaisia vaikutuksia tuotetiedonhallintajärjestelmän vaihtamisella saattaisi olla mallin käyttämiselle ja käyttökelpoisuudelle, sillä mikäli arvioidaan sitä, mitkä käytössä olevista järjestelmistä ovat niitä, joiden vaihtamista tulevaisuudessa voidaan todennäköisimmin harkita, on mahdollisuus tuotetiedonhallintajärjestelmän vaihtumiseen suurempi kuin esimerkiksi CAD-järjestelmän osalta.

Mikäli ajatellaan kustutinpalkin parametrinen mallin toimintaa yleisesti tuotetiedonhallintajärjestelmien kanssa, voidaan havaita muutamia edellytyksiä mallin ja tuotetiedonhallintajärjestelmän väliselle yhteistoiminnalle. Näitä ovat:

- mahdollisuus käyttää malleja, joissa ”In context”-referenssejä
- mahdollisuus kopioida tuoterakenteiden dokumentteja valikoiden uusille dokumentti- ja nimiketunnuksille referensseineen (edellinen kohta)
- mahdollisuus varata muokattavaksi valikoiden kaikki tuoterakenteen dokumentit
- mahdollisuus operoida malleja ja valmistuspiirustuksia suoraan suunnitteluhjelmistosta käsin (integraatio)

Mikäli tuotetiedonhallintajärjestelmää ollaan joskus tulevaisuudessa vaihtamassa, on valittavan järjestelmän arvioinnin yhteydessä syytä arvioida myös kyseisen järjestelmän integroimismahdollisuuksia kaupallisesti saatavilla oleviin SolidWorks- konfiguraattoreihin. Esimerkiksi KBCMax-konfiguraattoriohjelmisto on integroitavissa SolidWorks Enterprise PDM-tuotetiedonhallintajärjestelmään. Sinänsä on vaikea arvioida, kuinka suurella todennäköisyydellä kustutinpalkin parametrinen malli tulisi käyttökelpottomaksi, mikäli tuotetiedonhallintajärjestelmää päätettäisiin vaihtaa. Myöskään Aton- ja SolidPDM-järjestelmät eivät ole tuotekonfiguraattorien käyttämisen kannalta kaikkein joustavimpia työkaluja.

4.3.3. Parametrisen mallin ylläpito

Tuoteperheen sekä suunnittelujärjestelmien stabiliteetin ohella parametrisen mallin elinkaareen vaikuttaa suuresti suunnittelumallin ylläpito ja ylläpidettävyys. Mallin ylläpidettävyteen vaikuttavat erityisesti, kuinka mallin toiminta on dokumentoitu ja kuinka johdonmukaisesti malli on rakennettu. Kostutinpalkin mallin kohdalla ylläpidettävyteen on pyritty kiinnittämään huomiota ryhmittelemällä Design Table-muuttujat ja niiden määrittelemiseen käytettävät muuttujat Excel-taulukkoon siten, että mallin toiminta olisi myös muille kuin mallin tekijälle ymmärrettävissä. Mallin eri parametrien välillä on myös pyritty välttämään tarpeettoman pitkiä riippuvuusketjuja, jotta parametrien välisten relaatioiden hahmottaminen ei olisi liian vaikeaa.

Mallin ylläpitoa voidaan jaotella sen mukaan, mistä tarve mallin muuttamiselle ja päivittämislle tulee. Tarve päivittää mallia voi johtua muutoksista kostutinpalkin rakenteessa, muutoksista osien piirustuksiin tai muutoksista ohjelmistoympäristössä. Tavallisimmat muutokset, jotka koskevat mallin geometriaa tai piirustuksia, toteutetaan pääasiassa skeleton-mallin geometriaa ja Design Table-taulukkoa muokkaamalla. Ohjelmistoympäristön muutoksista aiheutuvat muutokset rajoittuvat eri ohjelmien versiomuutoksista mahdollisesti aiheutuviin muutostarpeisiin, kuten esimerkiksi Solid-Works:n yhtälöiden syntaksin muutoksiin.

Mallin ylläpidon kannalta on tärkeää, että mallin ylläpito osoitetaan mieluiten yhdelle henkilölle, olettaen, että kyseisellä henkilöllä on tarvittaessa käytettävissä riittävästi aikaa mallin ylläpitämiseksi. Luonnollista olisi, että mallin ylläpidosta ja kehityksestä vastaava henkilö olisi myös mukana kostutinpalkin tuotekehityksessä ja suunnittelussa ainakin siinä määrin, että rakenne ja sen toimintaperiaatteet olisivat tuttuja. Tärkeintä kuitenkin on, että mallin ylläpitoon osoitetaan resursseja, jotta malli ei jää tulevaisuudessa käyttämättä pelkästään sen takia, ettei kenelläkään ole aikaa sen päivittämiseksi.

5. TULOKSET

Tämän diplomityön tuloksena saatiin 4-rivisen kostutinpalkin parametrinen CAD-malli, jolla voidaan tuottaa projektikohtaiset mallit sekä valmistuspiirustukset. Projektin alussa oli tavoitteena saada vähennettyä projektikohtaisia suunnittelutunteja kostutinpalkin mekaniikkasuunnittelusta 40 % nykyisestä tuntimäärästä. Parametrisella mallilla kostutinpalkin CAD-mallien muokkaaminen kestää muutamia minuutteja, riippuen paljolti ratalevyden suuruudesta. Suurilla ratalevyksillä palkin mallissa on huomattavasti enemmän komponentteja sekä piirteitä, joiden uudelleen laskeminen kestää hieman kauemmin verrattuna lyhyisiin ratalevyksiin. CAD-suunnittelukäytössä olevilla koh- tuullisen tehokkailla tietokoneilla mallin päivitysaika pysyy kuitenkin alle 20 minuutis- sa.

Kun käytetään parametrista mallia uusien projektikohtaisten dokumenttien tuottami- ssa, kuluu suurin osa ajasta uusien nimikkeiden ja dokumenttien luomiseen tuotetie- donhallintajärjestelmässä sekä valmistuspiirustusten tarkastamiseen. Tarkemmin eritel- tynä suurin osa ajasta kuluu projektikohtaisten nimiketietojen täydentämiseen sekä pro- jektikohtaisen mallirakenteen kopioimiseen uusille dokumentti- ja nimiketunnuksille. Mikäli verrataan kostutinpalkin suunnitteluun tarvittavaa aikaa parametrisella mallilla ja käytössä olevalla menetelmällä voidaan arvioida, että parametrinen mallin avulla on mahdollista saada kostutinpalkin suunnittelu-aikaa pienennettyä noin 10 %:iin nykyisestä ajasta. Tässä kohtaa on hyvä muistuttaa, että edellä mainitut arviot suunnittelun ajan- säästöistä ovat arvioita kostutinpalkin suunnitteluun liittyen. Projekteissa on edelleen suunniteltava myös palkin liikuttelulaitteisto, joka suunnitellaan sen mukaan, millaiseen paikkaan paperikoneessa palkki asennetaan ja kuinka paljon liikettä palkilta vaaditaan käyttö- ja päänvientiasentojen välillä. Lisäksi asennusympäristöstä riippuvat myös put- ki- ja letkuviennit, jotka on suunniteltava asennuspaikan sekä liikutuslaitteiston liike- matkan mukaisesti.

Parametrinen mallin potentiaalin täysipainoinen hyödyntäminen edellyttää, että mal- lista tehdään vielä riittävän hyvä dokumentaatio, joka sisältää ns. pikaohjeen mallin peruskäyttöön sekä yksityiskohtaisemman ohjeen mallin muokkaamista varten. Lisäksi mahdolliset ongelmatilanteet on pyrittävä purkamaan ja ratkaisemaan tehokkaasti en- simmäisten kokeilujen aikana, jotta korjausta vaativia osa-alueita ei jäisi ”roikkumaan”.

Tässä työssä kehitettyä 4-rivisen kostutinpalkin parametrisesti ohjautuvaa skeleton- mallia on voitu hyödyntää myös 2-rivisen kostutinpalkin suunnittelussa. Koska 2- rivinen kostutinpalkki on lähestulkoon kuin puoliksi halkaistu 4-rivinen palkki, voidaan skeleton-mallista poistaa osa poikkileikkauksen toisen puolikkaan geometriasta, jolloin mallia voidaan käyttää 2-rivisen palkin mallintamisessa. Näin mallissa jää valittavaksi

liityntöjen (vesi, ilma, sumunpoisto) paikat, suuttimien numeroinnin suunta sekä telan halkaisija. Telan halkaisija ei luonnollisesti vaikuta 2-rivisessä palkissa muuhun kuin päätyjen tiivistyslevyjen sekä kaavareiden levyjen mittoihin.

6. TULOSTEN TARKASTELU

Tässä luvussa analysoidaan hieman saatuja tuloksia niiden kelvollisuuden puolesta. Lisäksi tarkastellaan hieman sitä, kuinka nyt saatuja tuloksia voitaisiin edelleen kehittää eteenpäin sekä millaisia mahdollisia puutteita niihin liittyy.

6.1. Vertailu vanhoihin projekteihin

Oleellinen tapa arvioida parametrisen mallin kelvollisuutta on tarkastella parametrisella mallilla tuotettavissa olevia kostutinpalkin malleja vertaamalla niitä vanhojen projektien toimituksiin. Lähtökohtaisesti parametrisella mallilla olisi voitava tuottaa jokaisen vanhan projektin parametrijohdistelmää vastaavat mallit ilman, että malleja tarvitsisi enää parametrien valinnan jälkeen muokata.

Soveltuvuus toimitettujen kostutinpalkkien asennusympäristöön voi riippua luonnollisesti myös kostutinpalkin rakenteen muutoksista. Kuten luvussa 2.3.3 on todettu, tarkoittaa suunnittelun automatisointi ja mallien parametrisointi usein myös sitä, että joillekin ratkaisuille haetaan sellaisia vaihtoehtoja, jotka ovat kelvollisia useammassa eri tilanteessa, vaikka eivät välttämättä olisi jossain tietyssä tapauksessa yhtä tehokkaita kuin projektikohtaisesti suunniteltu vaihtoehto. Toisaalta, koska kostutinpalkin rakennetta on vanhoihin projekteihin verrattuna kehitetty, on uudessa kostutinpalkissa myös sellaisia ominaisuuksia ja ratkaisuja, jotka tekevät siitä tietyiltä osin paremman ja joustavamman kuin vanhan rakenteen. Esimerkiksi uudessa rakenteessa voidaan ilman-syötön, suuttimien veden ja sumunpoiston liittynät sijoittaa kumpaan tahansa päätyyn palkkia toisistaan riippumatta.

Tämän diplomityön tuloksena syntyneitä parametrissa mallia vertailtiin aikaisempiin toimitusprojekteihin valitsemalla vertailukohdaksi 35 tämän työn kannalta relevanttia 4-rivisen kostutinpalkin toimitusprojektia noin viimeisen kymmenen vuoden ajalta. Tämän työn kannalta relevanteiksi projekteiksi katsottiin sellaiset projektit, joiden kostutinpalkin ovat tekniikaltaan ja ratkaisumenetelmiltään sellaisia, että niiden mitoitusta ja sopivuutta eri kohteisiin voidaan järkevästi vertailla tämän työn tuloksiin. Vertailun kohteina olivat kostutinpalkin rataleveys ja muut asennukseen vaikuttavat mitat, jotka on esitetty alla olevassa taulukossa 6.1.1. Tietojen suojaamisen vuoksi projektien nimiä tai vuosilukuja ei taulukossa ole mainittu, vaan eri projektit on ainoastaan numeroitu satunnaisessa järjestyksessä. Projektin nimi, vuosiluku tai toimitusmaa ei kuitenkaan ole tämän työn tulosten vertailun kannalta kovinkaan oleellisessa asemassa. Taulukossa esitettävällä rataleveyden arvolla tarkoitetaan tässä yhteydessä kostutinpalkin ensimmäisen ja viimeisen suuttimen välistä etäisyyttä.

Taulukko 6.1.1: Vertailu toimitettuihin projekteihin

Projekti no.	Rataleveys (mm)	Telan halkaisija (mm/suora osuus)	Sopivuus ("X"/"-")
1	5610	suora	X
2	5610	suora	X
3	10650	1500	-
4	8970	1500	X
5	8970	1500	X
6	5610	suora	X
7	9810	?	X
8	9090	1500	X
9	4650	1500	X
10	4290	suora	X
11	10410	1500	X
12	10410	1500	X
13	7770	1500	X
14	10770	?	-
15	6930	?	X
16	5130	suora	X
17	4650	suora	X
18	8970	1500	X
19	10770	1500	-
20	6450	1500	X
21	6690	1200	X
22	6690	1200	X
23	2250	suora	X
24	8250	1500	X
25	7410	suora	X
26	8610	1830	X
27	9690	1830	X
28	5130	suora	X
29	4770	1500	X
30	7650	suora	X
31	4890	1200	X
32	4890	1200	X
33	6690	1830	X
34	6450	suora	X
35	6450	suora	X

Kuten taulukosta nähdään, voidaan työn tuloksena saadulla suunnitteluautomaatilla tuottaa suunnitteludokumentaatio kolmea kohdetta lukuun ottamatta kaikkiin muihin tarkasteltuihin projekteihin. Nämä kolme projektia ovat sellaisia, joissa rataleveys on hieman parametrisen mallin alueen ulkopuolella, mutta parametrialuetta voidaan rataleveyden osalta helposti laajentaa nykyisestä. Sen sijaan tarkastelun kohteeksi tällaisessa tilanteessa tulisi asettaa palkin mahdolliset rakenteelliset rajoitukset kuten taipuman maksimiarvo, tilan riittävyys liitynnöille (vesiletkut) sekä ilmansyöttökanavan poikkipinta-alan riittävyys suuremmalle määrälle suuttimia.

Vertailu vanhoihin projekteihin osoittaa, että parametrinen suunnittelumalli ei itsessään ole rajoittava tekijä toimitusprojektien mahdollisuutta pohtiessa niin kauan kun pidetään mielessä, että pyritään välttämään sellaisia tilanteita, joissa tarjotaan asiakkaille tarpeettomasti sellaisia ratkaisuita, joita ei ole suunnittelumallissa etukäteen määritellyt. Tämä vertailu ei kuitenkaan ota kantaa siihen, onko eri kustutinpalkkien kehitysversioiden välillä sellaisia eroja mitoituksessa, josta aiheutuisi, että parametrisella suunnittelumallilla toteutettu uuden mallinen kustutinpalkki ei sopisi sellaiseen asennuskohteeseen, johon kustutinpalkki on aikaisemmin asennettu. Tällaisilla eroilla tarkoitetaan esimerkiksi etäisyyttä palkin päädyistä ensimmäiseen suuttimeen, joka puolestaan vaikuttaa liikuttelulaitteistolle jäävään tilaan.

6.2. Hyötyjen arviointi

Tällaisen kehitysprojektin kannalta on kiinnostavaa, kuinka paljon työn tuloksilla voidaan lopulta saavuttaa kehitystä ja päästiinkö alussa asetettuihin tavoitteisiin. Mikäli tutkitaan aikaisempien projektien yhteydessä kustuttimen suunnitteluun käytettävää aikaa, huomataan, että pelkän kustutinpalkin suunnitteluun käytettävän ajan realistinen arviointi on jokseenkin haasteellista. Tämä johtuu siitä, että projektiaikatauluissa ei ole yleensä eritelty palkin suunnittelua muusta mekaniikkasuunnittelusta (liikutuslaitteet, tippakaukalo yms. varusteet), minkä lisäksi eri suunnittelutehtäviä voi joissain tapauksissa olla hankala erottaa toisistaan, koska eri osa-alueet saattavat vaikuttaa myös toisiinsa merkittävästi.

Tätä arviota tehtäessä paras referenssi käytetystä suunnitteluajasta oli eräästä 2-rivisen sumunpoistolla varustetun kustuttimen projektista. Mikäli verrataan suunnittelu-aikoja 2- ja 4-rivisen palkkien välillä voidaan hyvin olettaa, että 4-rivisen kustutinpalkin mekaniikkasuunnitteluun kuluva aika on jonkin verran suurempi, sillä 4-rivinen rakenne sisältää enemmän komponentteja, joten myös projektikohtaisten valmistuspiirustusten määrä on suurempi. Näihin tuntimääriin verrattuna parametrisella mallilla saavutettavissa oleva suunnittelu-aika on noin 10 % nykyisestä ajasta. Kun tätä verrataan siihen kauanko parametrisen mallin kehittämiseen kuluu aikaa tarkoittaisi se, että kahdeksannen projektin kohdalla oltaisiin säästetty parametrisen mallin kehittämiseen kulunut aika.

Nämä arviot sisältävät kuitenkin huomattavan määrän oletuksia sekä aikaisemmasta työmäärästä että todellisesta saavutettavasta aikahyödystä per projekti. Ajansäästön li-

säksi tulee kuitenkin huomioida muut mahdolliset hyödyt kuten mahdolliset säästöt laatu- ja kustannuksissa, mikäli esimerkiksi tietyssä määrin automatisoitujen valmistuspiirustusten käytöllä voidaan vähentää virheiden määrää valmistusdokumentaatioissa. Näiden vertailujen pohjalta voidaan kuitenkin todeta, että alussa asetetut tavoitteet 40 % säästöstä kustutinpalkin suunnittelutunneissa ovat hyvinkin realistisia.

6.3. Kehityskohteita

Vaikka parametrisen mallin käyttöönotolla voidaan saavuttaa suuria säästöjä projekti-kohtaisen suunnittelun määrässä, on malleissa ja niiden hyödyntämisessä edelleen kehitettävää sekä mahdollisuuksia laajentaa parametrinen mallien käyttöä myös muihin kohteisiin. Tässä luvussa käsitellään mahdollisia kehityskohteita Metso Automationin projekteissa, sekä mihin asioihin kustutinpalkin osalta on syytä kiinnittää huomioita.

6.3.1. Mallit ja ohjelmistot

Kuten aikaisemmissa luvuissa on useaan kertaan tullut esille, kuluu parametrista mallia käytettäessä suurin osa ajasta projektisuunnittelussa valmistusdokumenttien tarkastamiseen ja läpikäymiseen sekä dokumenttien kopioimiseen ja nimikkeiden avaamiseen tuotetiedonhallintajärjestelmässä. Mikäli projektikohtaisen valmistusdokumentaation luomiseen kuluva aikaa haluttaisiin nykyisestään edelleen pienentää, tulisi huomio kiinnittää ennen kaikkea CAD- ja tuotetiedonhallintajärjestelmän väliseen integraatioon. Uusiin projektikohtaisten nimikkeiden avaamisen yhteydessä projektikohtaisten nimiketietojen täydentäminen on edelleen manuaalista työtä. Tuoterakenteet, kuten yksittäisten osien materiaalinimikkeet tosin saadaan kopioitua master-nimikkeiden rakenteista.

Mikäli tähän työvaiheeseen haluttaisiin parannusta, olisi yhtenä mielenkiintoisena kehitysvaihtoehtona esimerkiksi nimeämisen automatisoiminen siten, että kaikkien projektikohtaisten nimikkeiden kuvauksessa tietty ennalta määritetty osuus päivittyisi vastaamaan projektin nimeä. Tämä vähentäisi selkeästi manuaalisen työn määrää sekä pienentäisi virheiden mahdollisuutta, vaikka toisaalta nimikkeen kuvauksessa oleva kirjoitusvirhe ei ole läheskään yhtä vakava tai kohtalokas kuin esimerkiksi valmistuspiirustuksesta puuttuvat mitat. Tämän toteuttaminen voisi onnistua esimerkiksi makron avulla, jolla täytetään SolidWorks-tiedostojen *Custom Properties*-kentät ennen siirtoa Atoniin.

Lisäksi – kuten luvussa 4.2.2 todettiin – ovat SolidPDM:n ”Edit All”-toiminnon käyttöönotto ja toimintatavat mallia muokattaessa tärkeässä osassa siinä, kuinka jouhevasti uusien dokumenttien tuottaminen onnistuu. Erityisen tärkeässä asemassa on tehdä selkeä jako ohjeistuksessa siinä, mitkä mallit ovat projektikohtaisesti muokkautuvia ja mitkä pysyvät vakioina. Toisaalta FINAL-tilassa olevien vakiodokumenttien päivittämisen vahingossa ei pitäisi olla edes mahdollista.

6.3.2. Liikutuslaitteisto

Vaikka kostutinpalkin suunnittelu voidaan nyt toteuttaa osittain automatisoidusti, on projekteissa edelleen suunniteltava liikuttelulaitteisto sekä putkitusten viennit kostutinpalkin asennuspaikan mukaan. Mikäli kostutinpalkki asennetaan telaa vasten, käytetään useimmiten lineaariliikutuslaitteistoa, joka koostuu johteiden osista, sylintereistä sekä palkin pyöritysmekanismista, jolla palkki voidaan kääntää oikeaan asentoon. Itse liikkeen aikana palkki ei kuitenkaan käännä, vaan liikkuu ainoastaan sylintereiden suuntaisesti. Lineaariliikutuslaitteistossa muuttujat liikutuslaitteistojen välillä ovat liikematka, käyttövoima (pneumaattinen/hydraulinen) sekä tarvittava voima. Käyttövoima sekä tarvittava voima riippuvat ratalevydestä ja siten kostutinpalkin painosta, sillä pneumaattista liikuttelulaitteistoa ei ole järkevää tai mahdollista käyttää kaikkein raskaimmilla palkeilla. Lisäksi liikutuslaitteen kiinnitys paperikoneen runkoon saattaa vaihdella ratalevyden ja palkin massan mukaan, sekä silloin, mikäli rungossa on olemassa valmiita kiinnityspisteitä tai joitain kiinnitystä ja sijoittelua rajoittavia tekijöitä.

Nykyisen lineaariliikutuslaitteen hieman huonona puolena on se, että johteiden sekä pyörityslaipan osat sisältävät kohtuullisen paljon koneistettavia pintoja, mikä nostaa liikutuslaitteiston hintaa. Lisäksi varsinkin liikutuslaitteistossa käytettävät haponkestävästä teräksestä valmistetut hydrauliset sylinterit ovat todella hinnakkaita, joten liikutuslaitteiston uudelleensuunnittelulla olisi todennäköisesti saavutettavissa kustannussäästöjä.

Toinen liikuttelulaitteiston tyyppi on ns. vipuliikutuslaite, jota käytetään useimmiten silloin, kun kostutinpalkki asennetaan paperiradan telojen väliselle osuudelle, mutta toisinaan myös silloin, mikäli palkki asennetaan telaa vasten. Tällä liikutuslaitteella palkki myös kiertyy hieman, kun palkkia liikutetaan käyttöasennosta päänvientiasentoon. Lineaariliikutuslaitteeseen verrattuna on tässä liikutuslaitteessa lisäksi mitoitettava palkkia kannattelevat varret palkin massan mukaan. Varret voitaisiin mitoittaa esimerkiksi tiettyjen ratalevyksien välein. Tosin mikäli projekteissa tarvitaan huomattavan eripituisia varsia johtuen asennuspaikan etäisyydestä koneen runkoon, saatetaan törmätä siihen ongelmaan, että varsien pituudet vaihtelevat liian paljon järkevän parametrisoinnin toteuttamiseksi. Tällöin vaihtoehtona voisi olla kytkeä liikutuslaitteiden mitoitus FEM-laskentaan, mutta kun otetaan huomioon suhteellisen pienet määrät tämäntyyppisten liikuttelulaitteiden suunnittelussa, ei tämä todennäköisesti olisi kannattavaa.

Kaiken kaikkiaan parametrisointia ja suunnittelun automatisointia voitaisiin soveltaa myös liikuttelulaitteistojen suunnitteluun, ainakin suuressa osassa projekteja. Ennen kuin parametrinen mallin toteuttamista liikuttelulaitteistoista kannattaa kuitenkin alkaa suunnitella, kannattaa liikutusratkaisuiden rakenne optimoida käytettävien komponenttien, materiaalien yms. kustannusten suhteen. Lisäksi liikuttelulaitteistosta tulisi suunnitella mitoiltaan niin kompakti, että se sopii suurimpaan osaan projekteista ilman erillisiä muutoksia.

6.3.3. Suihkunsäätömekanismi

Vaikka suihkunsäätömekanismin toteutusta parametrisessa mallissa ei ole tämän työn aikaisemmissa luvuissa käsitelty yksityiskohtaisesti, on syytä tuoda esiin suihkunsäädön määrittelyyn liittyvät mahdolliset kehityskohdat. Osassa vanhoista projekteissa suihkunsäätö on toteutettu siten, että riippumatta siitä, mihin asentoon suihkunsäätö on säädetty, peittää se palkin ensimmäiset suuttimet kokonaisuudessaan. Mikäli suihkunsäätöä halutaan käyttää kaikilla rataleveyksillä, eli mekanisme ei tulla purkamaan missään yhteydessä, ei tällaisessa rakenteessa ole palkin toiminnan kannalta järkeä, sillä tällöin ensimmäiset suuttimet ainoastaan lisäävät veden vuotoriskiä palkin päistä.

Tämän vuoksi kannattaisi harkita sellaista vaihtoehtoa, että suihkunsäätölaitteiston pituus (eli käytännössä haluttu erotus rataleveyden minimi- ja maksimiarvojen välillä) kytkettäisiin parametreihin siten, että suihkunsäätö ei rataleveyden maksimiasennossa peitä ensimmäisiä suuttimia. Mikäli tarvittaisiin suurempaa säätövaraa, siirtyisivät ensimmäiset suuttimet kauemmaksi palkin päästä. Toisaalta tämän ratkaisun huonona puoleena on, että suihkunsäädön leveyden kasvaessa ensimmäisen suuttimen etäisyys palkin päästä kasvaa, mikä saattaa vaikeuttaa sopivan asennuspaikan löytämistä. Mutta vastavasti suuttimista palkin päässä ei ole mitään hyötyä, mikäli ne aina peitetään suihkunsäätömekanismilla.

6.4. Rajoitteet ja riskit

Parametristen mallien käytöllä saavutettavat hyödyt ovat kiistattomia, mutta hyötyjen lisäksi on olemassa myös riskejä. Usein suunnitteluautomaattien käyttöön liittyy mahdollisuus tuottaa valmistus- ym. dokumentteja, vaikka mallin käyttäjällä ei olisi mitään tietoa itse suunniteltavan laitteen toiminnasta tai suunnitteluperiaatteista. Tällöin on ainakin teoriassa mahdollista – etenkin, jos suunnittelumalli on toteutettu niin, ettei suunnittelusäännöstö ole helposti kaivettavissa esille – että tietotaito tuotteen toiminnasta häviää yrityksestä. Toisaalta tämä skenaario ei kuitenkaan vaikuta tässä tapauksessa todennäköiseltä, sillä tietoa laitteen toiminnasta on suhteellisen suurella joukolla henkilöitä. Mallin toteutusvaiheessa tiedon hankkiminen ja sen ilmeneminen pieninä paloina aiheutti toisinaan pieniä haasteita ja tarpeita mukautua nopeasti uuteen tietoon. Tiedon löytymisen kannalta kustutinpalkin suunnittelumalli on kuitenkin rakennettu verrattain helposti ymmärrettäväksi, eikä sen sisältämien suunnittelusäännösten lukemiseksi tarvitse esimerkiksi osata mitään ohjelmointikieltä, sillä kaikki tiedot on esitetty Excel- taulukoissa. Toisaalta, vaikka tietämys laitteen toiminnasta vähenisi, on hyvin toteutuksessa suunnitteluautomaattisovelluksessa mahdolliset ratkaisukombinaatiot rajattu niin, että samanlaisia suunnitteluvirheitä, joita on mahdollisesti aiemmin tehty, ei enää tapahdu.

Kuten aikaisemmin on monesti todettu, tarkoittaa parametriseen malliin siirtyminen usein sitä, että joistakin tuotteen teknisistä ratkaisuista on tehtävä sellaisia, jotka soveltuvat useampaan käyttötapaukseen, vaikka eivät tarjoaisikaan yhtä optimaalista suori-

tuskykyä kuin projektikohtaisesti suunnitellut ratkaisut. Samalla tavalla voidaan todeta, että joissakin tapauksissa vakiokomponenttien käyttäminen varianttikohtaisten komponenttien asemesta saattaa myös heikentää tuotteen suorituskykyä. Esimerkiksi kostutinpalkin poikkileikkauksen mitat mitoitettiin niin, että kaikissa pituusvarianteissa käytetään sellaisia mittoja, joilla palkin taipuman maksimi on pisimmillä palkeilla halutuissa rajoissa. Näiden mittojen mukaan puolestaan mitoitettiin kostutinpalkissa käytettävät muoviset huoltoluukut, jotka tulevat olemaan samoja kaikissa varianteissa.

Mikäli kaikki variantit olisi optimoitu taipuman suhteen, olisi lyhyemmistä palkeista tullut poikkileikkaukseltaan pienempiä sekä kevyempiä, jolloin niiden valmistuskustannukset olisivat ohutlevyosien osalta olleet todennäköisesti edullisempia. Tällöin ei kuitenkaan olisi voitu käyttää samoja muovisia huoltoluukkuja kaikissa palkeissa, jolloin luukut olisi tehtävä metallista, ja ne olisivat automaattisesti kalliimpia tai olisi valmistettava useampia muotteja muoviluukuille. Sen lisäksi mallin optimoiminen taipumien suhteen olisi ollut aikaa vievää ja työlästä, minkä lisäksi mallin ylläpidosta olisi tullut vaikeampaa. Samalla manuaalisen työn osuus olisi lisääntynyt, kun tuoterakenteita luodaan tuotetiedonhallintajärjestelmään, sillä levymateriaalien nimikkeitä ei enää olisi voinut kopioida suoraan master-nimikkeiltä. Huomattavaa kuitenkin on, että vaikka aikaisemmin kostutinpalkit on suunniteltu projektikohtaisesti eikä niissä ole käytetty muovisia huoltoluukkuja tai muita vakiokomponentteja, jotka rajoittavat poikkileikkauksen korkeutta, on poikkileikkauksen mitat pidetty vakioina palkin pituudesta riippumatta.

6.5. Tulevat toimenpiteet

Kostutinpalkin osalta tulevat toimenpiteet voitaisiin jaotella kostutinpalkin rakenteeseen liittyviin toimenpiteisiin sekä tässä työssä kehitettyyn parametriseen malliin liittyviin toimenpiteisiin. Vaikka kostutinpalkin rakenteen kehitys ei suoranaisesti ollut tämän työn pääasia, liittyy se kuitenkin parametriseen malliin sen verran keskeisesti, ettei sitä tässä kohtaa voida sivuttaa.

Kostutinpalkin rakenteen osalta uusien ratkaisuiden testaus on jo tavallaan käynnissä, sillä uusia ratkaisuja on testattu joidenkin ratkaisujen osalta prototyypeissä (esimerkiksi kaavareiden rakenne), ja loppujen ratkaisuiden testaus jatkuu 2-rivisen kostutinpalkin pilottiprojektien myötä. Kun nämä projektit on saatu siihen vaiheeseen, että rakenteen ratkaisuihin saadaan ensimmäiset kommentit valmistettavuuden, kustannusten ja toimivuuden suhteen, tehdään tarvittavat muutokset ja päivitetään ne myös 4-rivisen kostutinpalkin malliin.

Suunnittelumallin osalta avainasemassa on mallin toimivuuden tarkastaminen etenkin piirustusten osalta sekä mallin käyttöön tarvittavan dokumentoinnin laatiminen. Dokumentoinnin osalta tulee keskittyä etenkin järjestelmän käyttöön PDM-järjestelmän kanssa. PDM-järjestelmään tulee luoda aikaisemmissa luvuissa esitetyt master-nimikkeet ja -dokumentit, jotka toimivat pohjana tuleville projektidokumenteille ja -

nimikkeille. Lisäksi on tehtävä suunnitelma siitä, kuka tai ketkä tulevaisuudessa vastaavat mallin ylläpitämisestä.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET JA PÄÄTELMÄT

Suunnittelun automatisointi parametrisia malleja tai suunnitteluautomaatteja hyödyntäen tarjoaa tehokkaan mahdollisuuden vähentää rutiininomaisen suunnittelutyön määrää, lyhentää suunnittelun läpäisyajoja sekä karsia suunnittelussa tapahtuvia virheitä. Parametriset mallit soveltuvat parhaiten sellaisiin tuotteisiin ja tuoteperheisiin, joiden variointitarpeet ovat hyvin ennakoitavissa sekä ovat sellaisessa elinkaaren vaiheessa, että niihin liittyvä suunnittelutieto on hallittavissa. Parametrinen mallin kehittäminen on järkevää yhdistää osaksi sellaista tuotekehitysprojektia, jossa tuotteen rakennetta voidaan samalla muokata ja päivittää vastaamaan suunnittelun automatisoinnin asettamia tarpeita, sillä joissain tapauksissa tuoteperheiden tuotteet voivat olla rakenteellisesti niin hajautuneita, ettei suunnittelun automatisointi tuotteisiin sellaisenaan välttämättä edes onnistuisi.

Erityisesti parametrinen mallien ja suunnitteluautomaation käyttöä on pidettävä strategisena päätöksenä, jolloin on tiedostettava, millaisia muutoksia toiminnassa on mahdollisesti tehtävä, jotta suunnittelun automatisoimisella saavutettaisiin parhaat mahdolliset hyödyt. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että parametrisoitavien tuotteiden, kuten tässä tapauksessa kustutinpalkin kohdalla, pitäisi pyrkiä välttämään sellaisten ratkaisujen myymistä asiakkaille, joiden toteuttaminen vaatisi lisää manuaalista työtä mallin parametrien valinnan jälkeen.

Kustutinpalkin mallin osalta suurimmat haasteet lähitulevaisuudessa liittyvät mallin dokumentointiin sekä käyttöönottoon jokapäiväisessä suunnittelukäytössä. Koska tämän tyyppisiä malleja ei ole aikaisemmin käytetty nykyisessä PDM-järjestelmässä, vie oman aikansa ennen kuin parhaat työmenetelmät saadaan selville sekä mahdolliset parannusideat testattua ja otettua käyttöön.

LÄHTEET

Amadori, K., Tarkian, M., Ölvander, J. & Krus, P. Flexible and robust CAD models for design automation. *Advanced Engineering Informatics* 26(2012)2, pp. 180-195

Amrani, A., Zouggar, S., Zolhgardi, M. & Girard, P. Towards a collaborative approach to sustain engineer-to-order manufacturing. *Proceedings of 16th International Conference on Concurrent Enterprising (ICE 2010)*, Lugano, Switzerland, June 21-23, 2010. Red Hook, NY 2010, Curran Associates, Inc. pp. 170-171

AutomateWorks. [Verkkodokumentti] Viitattu 7.3.2014. Luettavissa: http://www.cadworkssoftware.com/uploads/cadworkssoftware/AutomateWorks_4_esite_FIN.pdf

Cederfeldt, M. Variant Design Automation – Strategy and Procedure for Storing Design Process Information. *ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Salt Lake City, Utah, USA, September 28 – October 2, 2004. *Proceedings of DETC 2004*. 16 p.

Cederfeldt, M. & Elgh, F. Design Automation in SMEs – Current State, Potential, Need and Requirements. *International Conference on Engineering Design*, Melbourne, Australia, August 15-18, 2005. *Proceedings of ICED 2005*. 15 p.

Chen, X., Gao, S., Yang, Y & Zhang, S. Multi-level assembly model for top-down design of mechanical products. *Computer-Aided Design* 44(2012)10, pp. 1033-1048

DriveWorks online documentation [Verkkodokumentti] Viitattu 7.3.2014. Luettavissa: <http://docs.driveworkspro.com>

Haug, A., Klaes, L. & Edwards, K. Reflections in the transition from ETO to Mass Customization. *4th International Conference on Mass Customization and Personalization – Extreme Customization*, Cambridge, MA, USA, October 7-10, 2007. *Proceedings of MCPC 2007*.

Hvam, L., Mortensen N.H. & Jesper, R. *Product Customization*. Heidelberg 2008, Springer-Verlag. 283 s.

Jiao, J., Tseng, M. M. Fundamentals of product family architecture. *Integrated Manufacturing Systems* 11(2000)7. pp. 469-483

Krishnapillai, R. & Zeid, A. Mapping product design specification for mass customization. *Journal of Intelligent Manufacturing* 17(2006)1. pp. 29-43

Lampel, J. & Mintzberg, H. Customizing Customization. *Sloan Management Review* 38(1996)1; pp. 21-30

Lehtonen, J-M (toim.). 2004. *Tuotantotalous*. WS Bookwell Oy. Porvoo. 292 s.

Messac, A., Martinez, M.P., Simpson, T.W. Introduction of a Product Family Penalty Function Using Physical Programming. *Journal of Mechanical Design* 124(2002)2. pp. 164-172

Olhager, J. Strategic Positioning of the Order Penetration Point. *International Journal of Production Economics* 85(2003)3. pp. 319-329

Pulkkinen, A. 2007. *Product Configuration in Projectinf Company: the Meetong of Configurable Product Families and Sales-Delivery Process*. Dissertation. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu – Tampere University of Technology. Publication 712. 184 s.

Qiao, G., Lu, R. & McLean, C. Flexible Manufacturing System for Mass Customization Manufacturing. *International Journal of Mass Customization* 1(2006)2, pp. 374-393

Scallan, P. 2003. *Process Planning: The Design/Manufacture Interface*. Oxford, Butterworth-Heinemann. 483 p.

Simpson, T.W., Siddique, Z. & Jiao, J. 2006. *Product Platform and Product Family Design Methods and Applications*. New York, NY, Springer Science+Business Media. 548 p.

SolidWorks: 2013 API-help [Verkkodokumentti] Viitattu 7.3.2014. Luettavissa: <http://help.solidworks.com/2013/English/api/sldworksapiproguide/Welcome.htm?id=76f23e7c95484153b8501b3f1ff4c4cb#Pg0>

SolidWorks: 2013 Help [Verkkodokumentti] Viitattu 7.3.2014. Luettavissa: http://help.solidworks.com/2013/English/SolidWorks/sldworks/c_introduction_toplevel_topic.htm?id=5524d830d37745d39ba3a8e4c0efec61#Pg0

Spahi, S. 2008. *Optimizing the Level of Customization for Products in Mass Customization Systems*. Dissertation. Orlando, Florida. University of Central Florida. Department of Industrial Engineering and Computer Science. 198 p.

Sunnersjö, S. Planning Design Automation Systems for Product Families – A Coherent, Top Down Approach. *Proceedings of DESIGN 2012, the 12th International Design*

Conference, Dubrovnik, Croatia, May 21-24, 2012. Glasgow, The Design Society. pp. 123–132

Tseng, M.M., Jiao, J. Design for Mass Customization. CIRP Annals – Manufacturing Technology 45(1996)1. pp. 153-156

Uusi-Rauva, E., Haverila, M., Kouri, I. & Miettinen, A. 2005. Teollisuustalous. 5. painos. Tampere. Tammer-Paino Oy. 510 s.